

Städt. Heinrich-Heine-Gymnasium

Seminararbeit

aus dem Fach

Physik

Thema:

Kernfusion und deren technische Umsetzung

Verfasser: Selina Friesen

Kursleiter: Tim Neupert

Erzielte Note: In Worten:

Erzielte Punkte: In Worten:

Abgegeben bei der Oberstufenkoordination:

.....

Unterschrift des Kursleiters/ der Kursleiterin

Inhalt

1	Kernfusion – Teilaspekt der Kernenergie	3
2	Herausforderung der globalen Energieerzeugung	4
2.1	Energiebedarf und -erzeugung heute und in Zukunft.....	4
2.2	Fossile Energiequellen.....	5
2.3	Regenerative Energiequellen	5
2.4	Kernenergie.....	6
3	Kernfusion als mögliche Energiequelle von morgen.....	7
3.1	Unterschied zur Kernspaltung.....	7
3.2	Tokamak und Stellarator – zwei mögliche Prinzipien eines Fusionsgenerators	9
3.3	Fusionsgenerator – internationale Projekte	13
4	Fusionsgenerator Wendelstein 7-X: Ein deutsches Forschungsprojekt.....	15
4.1	Konzeption und Aufbau.....	15
4.2	Entwicklungsweg und Meilensteine.....	16
4.3	Ziele des Forschungsprojekts	17
5	Kernfusion als Lösungsansatz für das Energieproblem.....	18
	Abbildungsverzeichnis.....	19
	Literaturverzeichnis.....	20
	Erklärung zur selbstständigen Anfertigung	22

1 Kernfusion – Teilaspekt der Kernenergie

Die Kernenergie liefert derzeit einen nennenswerten Beitrag zur weltweiten Energieversorgung. Trotz der Vorteile eines im Vergleich zu anderen Energieerzeugern hohen Wirkungsgrades und einer ständigen Verfügbarkeit ist die heutige Technik, welche auf dem Prinzip der Kernspaltung beruht, aufgrund der Risiken im Falle eines Unfalls und ungelöste Probleme bei der Entsorgung des nuklearen Abfalls sehr umstritten. Allein die Folgen der Nuklearkatastrophe von Fukushima 2011 belasten die Menschen in Japan bis heute.

Die alternative Nutzung von regenerativen Energiequellen trägt zunehmend einen signifikanten Wert zur Deckung des wachsenden Energiebedarfes der Menschheit bei. Jedoch stoßen auch diese Energiequellen auf Probleme der Verfügbarkeit (Sonne, Wind), der begrenzten Ressourcen von nachwachsenden Rohstoffen (Holzeinschlag) bzw. der dafür notwendigen Umgestaltung von Lebensräumen (Staudammprojekte).

In allen Bereichen der Energiegewinnung wird nach neuen Technologien gesucht, die diese Nachteile vermeiden. Auch in der Kern- und Teilchenphysik wird nach weiteren Alternativen geforscht, um den ansteigenden Energiekonsum zu decken.

Ein Ansatz in diesem Bereich ist die Kernfusion. Es existieren verschiedene internationale wissenschaftliche Forschungen, um die Kernfusion zur Energiegewinnung in Zukunft wirtschaftlich zu nutzen. Insbesondere wird an zwei grundlegenden Prinzipien eines Fusionsreaktors gearbeitet. Neben dem schon länger genutzten Tokamak-Konzept ist eine weitere vielversprechende Technologie der sogenannte Stellarator. Diese Art des Fusionsgenerators wird derzeit in Deutschland im Projekt Wendelstein 7-X in Greifswald angewendet und erforscht. Nach erfolgreichen Versuchen 2018 könnte das Projekt W7-X die Grundlage für einen zukünftigen Prototypen eines Fusionsgenerators sein und somit den Grundstein für eine risikofreiere Energiegewinnung aus Nuklearenergie bilden.

Das Ziel dieser Seminararbeit umfasst die Beantwortung der Frage, ob die Forschung an der Entwicklung von Kernfusionstechnologien für die Energiegewinnung ein Ansatz ist, um das weltweite Energieproblem zu lösen. Dabei sollen die Unterschiede und Möglichkeiten eines zukünftigen Fusionsgenerators im Vergleich zu der heutigen Kernspaltungstechnologie herausgearbeitet werden. Dies wird detailliert anhand der aktuellen Forschungsarbeiten an dem Stellarator im Projekt Wendelstein 7-X gezeigt.

2 Herausforderung der globalen Energieerzeugung

2.1 Energiebedarf und -erzeugung heute und in Zukunft

Die Weltbevölkerung wird in absehbarer Zeit weiter wachsen und der Lebensstandard sich zudem erhöhen. Trotz vieler Bemühungen und Maßnahmen die Auswirkungen auf die Umwelt zu begrenzen, ist von einem weiteren steigenden Ressourcenverbrauch und wachsenden Energiebedarf auszugehen [1, p. 85f]. Die Studie des bp Energy Outlooks in Abbildung 1 zeigt deutlich die erwartete Steigerung des Primärenergieverbrauches bis zum Jahr 2040 (linke Grafik).

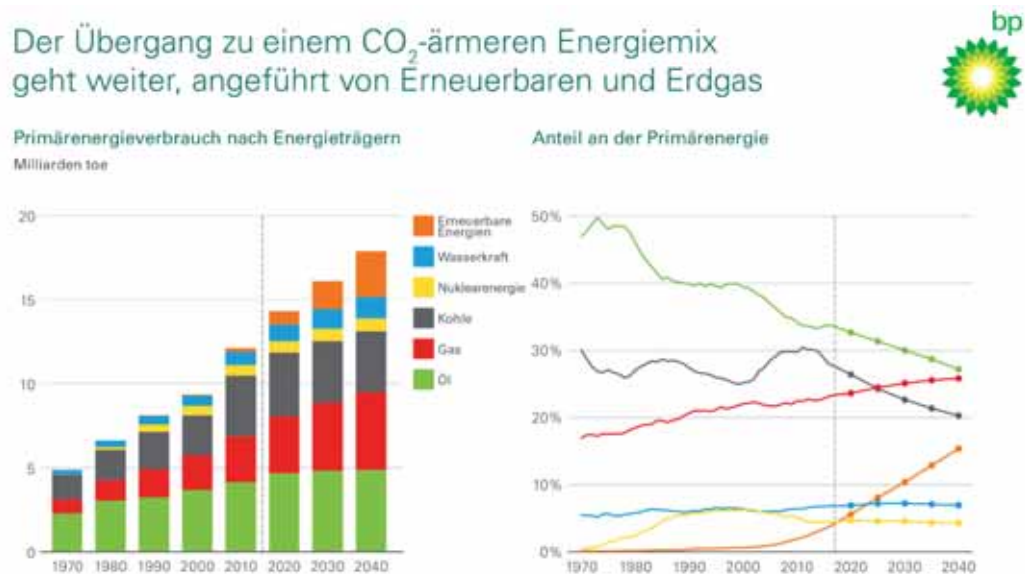


Abbildung 1: Primärenergieverbrauch nach Energieträgern und Anteil der Primärenergie
(Quelle: bp Energy Outlook, 2019 [https://www.bp.com/de_de/germany/home/presse/energie-analysen/energy-outlook/ausgewaehlte-grafiken-zum-energy-outlook.html] (Stand: 28.10.19))

Die bp-Studie zeigt ebenfalls die Entwicklung der jeweiligen Anteile an der benötigten Primärenergie (Abbildung 1, rechte Grafik). Die fossilen Energieträger werden auch weiterhin bis zum Jahr 2040 dominierend bleiben. Der Beitrag von Öl und Kohle wird dabei in Zukunft leicht sinken und der von Gas steigen. Die regenerativen Energiequellen werden zunehmend ausgebaut, während der Anteil der Nuklearenergie sowie der Wasserkraft nahezu gleich bleibt.

Die Herausforderung besteht nun darin, den Energiebedarf auch weiterhin nachhaltig und wirtschaftlich zu decken, sodass auch künftigen Generationen ein hohes Lebensniveau gesichert werden kann. Zusätzlich stellt sich die Frage, ob der sich ergebende Energiemix mit der dargestellten prozentualen Verteilung von Energieträgern auch in Zukunft die Grundlage einer langfristigen Energieversorgung sein kann.

2.2 Fossile Energiequellen

Zu den fossilen Energiequellen zählen Kohle, Erdöl und Erdgas. Diese sind langfristig gesehen eine endliche Ressource und darüber hinaus auf der Welt nicht gleich verteilt und müssen als Rohstoff zum Ort der Energieerzeugung teilweise weit transportiert werden. Der Anteil der fossilen Energiequellen in dem oben dargestellten Energiemix bleibt auch weiterhin sehr groß, da diese trotz des hohen Transportaufwands derzeit am kostengünstigsten sind. Zusätzlich wird die Endlichkeit dieser Rohstoffe ein immer größeres Problem für die Absicherung des benötigten Energiebedarfes sein.

Fossile Energieträger sind auch hinsichtlich der notwendigen Ziele des Klimaschutzes kontraproduktiv. Der über Jahrtausende gespeicherte Kohlenstoff in ihnen wird während der Energiegewinnung durch die Verbrennung in Form von Kohlenstoffdioxid freigesetzt. Dies erfolgt in einer erdgeschichtlich sehr kurzen Zeit und hat durch die damit forcierte Erderwärmung eine direkte negative Auswirkung auf das globale Klima [2, p. 5f].

Aus der langfristig begrenzten Verfügbarkeit folgt, dass Kohle, Erdöl und Erdgas den auch in der Zukunft steigenden Energiebedarf nicht decken können. Des Weiteren ist es politisch und gesellschaftlich anerkannt, dass der Anteil der fossilen Energieträger am Energiemix reduziert werden muss, um das Klima zu schützen.

2.3 Regenerative Energiequellen

Regenerative Energiequellen werden in den künftigen Jahren einen großen Teil unseres Energiemixes darstellen, da sie den entscheidenden Vorteil der Nachhaltigkeit haben. Diese Energiequellen, zu welchen die Biomasse, Wind- und Solarenergie sowie Wasserkraft und Geothermie zählen, zeichnen sich dadurch aus, dass sie idealerweise unbegrenzt verfügbar sind und keine schädlichen Endprodukte bei der Gewinnung entstehen. Sie haben keinen langfristigen Einfluss auf das Klima und belasten die Umwelt möglichst wenig. [3] Diese Eigenschaften sind die Hauptgründe und Motivation, weshalb an der Verbesserung der Nutzung der erneuerbaren Energiequellen weiter entwickelt und geforscht wird.

Neben den großen Vorteilen der regenerativen Energiequellen gibt es aber auch Faktoren, die deren Einsatz begrenzen. Die systembedingten Nachteile (z. B. eingeschränkte zeitliche Verfügbarkeit der Sonneneinstrahlung, notwendige örtliche Gegebenheiten des Windes, Umweltpassung bei der Wasserkraft und Effizienz der Energiegewinnung) dürfen nicht überwiegen und der gewünschten Nachhaltigkeit nicht entgegenstehen [2, p. 5f]. Somit wird es auch bei den einzelnen Formen der regenerativen Energiequellen nur einen begrenzten Ausbau

geben und es stellt sich die Frage, ob sie allein den zukünftig benötigten Energiebedarf der Welt decken können.

2.4 Kernenergie

Die Nutzung der Kernkraft zur Energieerzeugung erfolgt derzeit ausschließlich auf Basis der Technologie der Kernspaltung. Die klassische Spaltreaktion findet dabei mit einem schweren Uranisotop (^{235}U) statt. Dieses wird durch Neutronen gespaltet, wodurch Energie und zwei bis drei weitere Neutronen freigesetzt werden. Die freien Neutronen leiten dann weitere Spaltvorgänge ein und werden zu einer kontrollierten Kettenreaktion fortgeführt [4, p. 26] [5, p. 43]. Im Vergleich mit anderen fossilen Energiequellen entstehen bei der Kernspaltung keine direkten Luftschadstoffe oder Treibhausgase, weshalb die Energiegewinnung aus Kernkraft auch eine der effektivsten Technologien ist, die CO_2 -Emission zu begrenzen [1, p. 85f].

Jedoch ist die Kernspaltung sehr umstritten und wird kontrovers diskutiert, da mehrere Probleme auftreten können:

Die Energiegewinnung durch Kernspaltung kann nur in Kernreaktoren erfolgen, die mit besonderen Sicherheitsvorkehrungen ausgestattet sein müssen, um die komplexen physikalischen Prozesse zu beherrschen, die nicht unerhebliche Investitionen erfordern [6, p. 83ff].

Durch die anfallende Radioaktivität besteht außerdem die Gefahr einer Strahlenbelastung und einer erhöhten Aktivitätskonzentration (Aktivität eines Radionuklids pro Volumen). Ein Beispiel für einen Extremfall ist die Katastrophe bei dem Reaktorunfall in Fukushima [6, p. 98].

Das Hauptproblem der Kernenergie sind aber die langlebigen radioaktiven Abfälle. Während das Uranisotop in einer Halbwertszeit von 703,8 Mio. Jahren zerfällt, entstehen auch nach der Reaktion zusätzlich noch Spaltprodukte, deren Radioaktivität erst nach Millionen Jahren abgeklungen ist [7, p. 21]. Für deren Endlagerung wurde bisher keine nachhaltige Lösung gefunden [1, p. 35].

Trotz der Nachteile wurde schon vor über 40 Jahren erkannt, dass die Kernenergie dennoch ein wichtiger Bestandteil des Energiemixes ist. Deshalb wurde seitdem auch an alternativen Möglichkeiten geforscht die Kernenergie zu nutzen. Dabei steht die technische Umsetzung der Kernfusionstechnologie für eine wirtschaftliche Nutzung zur Energiegewinnung im Vordergrund [6, p. 134f].

3 Kernfusion als mögliche Energiequelle von morgen

3.1 Unterschied zur Kernspaltung

Die Technologie der Kernfusion hat im Gegensatz zur Kernspaltung das Ziel, Atomkerne zur Energiegewinnung miteinander zu verschmelzen. Die erste Fusionsreaktion in einem Labor wurde bereits 1919 von Rutherford durchgeführt, wobei die Kernfusionsvorgänge in der Sonne erst 1938 von den Physikern Bethe und Weizsäcker nachgewiesen worden sind. [8]

Die Sonne dient als Vorbild der Energieerzeugung durch Kernfusion. Dort verschmelzen Wasserstoffkerne bei Temperaturen um die 10.000.000 °C zu Helium (siehe Abbildung 2). Erst bei diesen Temperaturen können die im Wasserstoffkern vorhandenen Coulombkräfte überwunden werden und die Kerne in einer exothermen Reaktion miteinander fusionieren. Da dies auf der Erde nur schwer zu erreichen ist, werden für die Fusion leichtere Kerne der Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium genutzt. [1, p. 21f] [6, p. 136ff] [9, p. 352f]

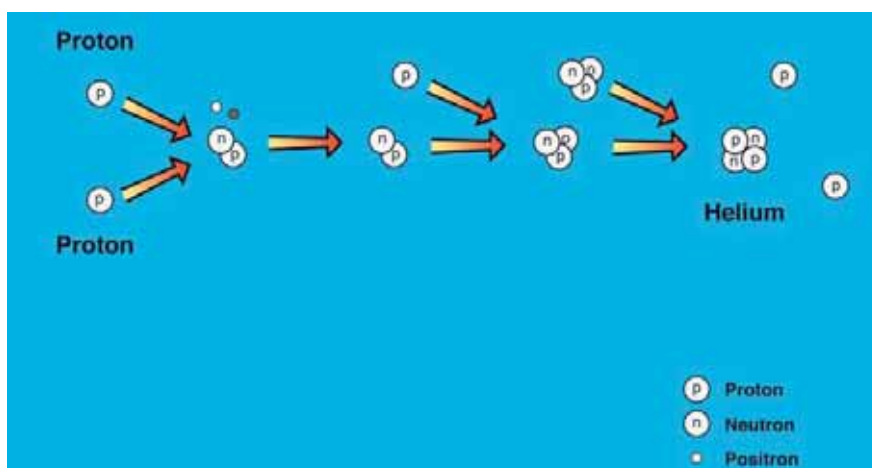


Abbildung 2: Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium

(Quelle: IPP, [<https://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/fusion21/kernfusion/index#>] (Stand: 28.10.19))

Bei der starken Erhitzung der Isotope bildet der Kernbrennstoff ein Plasma, in dem es keine gebundenen Elektronen mehr gibt. Die Kontrolle des Plasmas ist eine der großen Herausforderungen bei einer zukünftigen technischen Anwendung der Kernfusion. Das Plasma selbst ist in Bezug auf Temperaturverlust und Kontaminierungsgefahr sehr anfällig, weshalb es die Oberfläche eines Fusionsreaktors nicht berühren darf. Um diese Probleme zu umgehen, kommen der sogenannte Trägheitseinschluss oder alternativ der Einschluss mittels Magnetfeldes zum Einsatz. Beim Trägheitseinschluss kann das Plasma aufgrund des hohen Beharrungsvermögens der Teilchen nicht entweichen [1, p. 21]. Beim Magnetfeldeinschluss

erzeugen Spulen über Induktion ein permanentes magnetisches Feld, welches einen Käfig bildet, in dem das Plasma eingeschlossen ist und stark erhitzt wird.

Ist die Temperatur hoch genug, fusionieren die Atomkerne der Wasserstoffisotope Deuterium D (^2H) und Tritium T (^3H) zu Helium (^4He) und setzen Neutronen frei. Das bei der Reaktion freiwerdende Neutron n wird zusätzlich für die Erzeugung von Tritium genutzt, welches in der Reaktionskette weiter verwertet wird. [4, p. 20ff]

Die grundsätzliche Reaktionsgleichung für die Kernfusion sieht wie folgt aus:



Deuterium und Tritium reagieren zu Helium und einem freien Neutron unter einer Energiefreisetzung von 17,6 MeV. Alle derzeit relevanten Forschungen zur technischen Umsetzung eines Fusionsreaktors beruhen auf dieser Reaktion.

Eine auf dieser Grundlage basierende Technologie hat vielversprechende Vorteile:

Die benötigten Rohstoffe sind kostengünstig und beinahe unbegrenzt, da die Reaktion aus Wasserstoffisotopen besteht, welche auf der Erde natürlich vorkommen [8] [11]. Im Vergleich zu fossilen Energiequellen entstehen keine schädlichen CO_2 -Emissionen. Im Gegensatz zu regenerativen Energiequellen ist die Kernfusion nicht zeit- oder witterungsabhängig und benötigt keine großen Eingriffe in die Umwelt. [12, p. 4].

Auch gegenüber der Kernspaltung weist die Kernfusion signifikante Vorteile auf. Der wesentliche Punkt ist hierbei die Effizienz der Kernfusion. Im Vergleich mit einer Spaltreaktion ist der Energiegewinn pro Nukleon um ca. das Fünffache in einer Fusionsreaktion höher [9, p. 323]. Die Gefahr einer ungebremsten Kernreaktion wird kleiner, da sich nur geringe Mengen des eigentlichen Brennstoffs im Plasma befinden. Die Kontrolle der Kernfusion erfolgt über die Energiezufuhr zur Aufrechterhaltung eines beständigen Plasmas. [12, p. 3]. Der äußere Brennstoffkreislauf und somit die Wiederaufarbeitung der Kernbrennstoffe und die Gefahr der Aktivität und Radioaktivität in der Kernspaltung fällt komplett weg, da die Rohstoffe nur innerhalb des Plasmas fusionieren [6, p. 136ff]. Bei einem Fusionsreaktor entstehen auch nukleare Abfallprodukte. Diese haben gegenüber der heutigen Technologie der Kernspaltung eine wesentlich geringere Lebensdauer [12, p. 3]. Das entstehende Tritium hat nur eine Halbwertszeit von 12,32 Jahren und kann wiederverwendet werden [8]. Im Gegensatz dazu treten bei einer Kernspaltung Spaltprodukte auf, die Halbwertszeiten von mehreren Tausend bis Millionen Jahren besitzen. Die in einem Fusionsreaktor vorkommende Radioaktivität ist zwar

vergleichbar mit der eines Kernspaltungsreaktors, das Gefährdungspotential aber geringer, da die Radiotoxizität und Lebensdauer der induzierten Radionuklide weitaus niedriger sind, als die Spaltprodukte bei einer Kernspaltung [6, p. 140].

Die Wissenschaft hat die Möglichkeiten und Vorteile einer Kernfusion schon früh erkannt und beschäftigt sich schon lange mit der Erforschung des dazu notwendigen Plasmas [1, p. 21]. 1932 entdeckten amerikanische Forscher das Wasserstoffisotop Deuterium, welches für die Kernfusion besser geeignet ist, als gewöhnlicher Wasserstoff. Zwei Jahre später gelang es Harteck, Oliphant und Rutherford bei Verschmelzung von Deuterium-Kernen Tritium zu gewinnen. Während der Zeit des 2. Weltkriegs und den Jahren danach wurde die Forschung vor allem hinsichtlich der Anwendung der Kernfusion für den Aufbau und Test von Wasserstoffbomben vorangetrieben und damit bewiesen, dass die bis dahin nur theoretisch beschriebene Fusion von Atomkernen möglich ist. Es hat jedoch länger gedauert erste Ideen für mögliche Verfahren und Technologien zum Einschluss des Plasmas zu entwickeln, welche die Grundlage für die friedliche Nutzung der Kernfusion zur Energiegewinnung darstellen. Ab 1951 beteiligte sich die amerikanische Atomenergiekommission und europäische Wissenschaftler an den Forschungsarbeiten. Es entstanden zwei Vorschläge, wie die Kernfusion technisch umsetzbar sein könnte: Das Tokamak- und das Stellarator-Prinzip. [13, pp. 57-87]

3.2 Tokamak und Stellarator – zwei mögliche Prinzipien eines Fusionsgenerators

Grundaufbau eines Fusionsgenerators

Die technische Umsetzung der Kernfusion erfolgt in einem sogenannten Fusionsgenerator. Dieser muss grundsätzlich als Torus (in „Donut-Form“) gestaltet sein, damit der ringförmig geschlossene Plasmastrom durch Induktion erhitzt werden kann. Die Feldlinien der dazu benötigten Magnetfelder müssen so verlaufen, dass sie kontinuierliche Bahnen beschreiben. [9, p. 94]

Damit der Plasmastrom innerhalb des toroidalen Gefäßes bleibt und der entstehende Druck es nicht zerstört, müssen die äußeren stromdurchflossenen Spulen zur Stützung des Plasmas ebenfalls ein toroidales Magnetfeld erzeugen, in welchem die Feldlinien kontinuierliche Bahnen bilden. Das Plasma darf zudem nicht die Außenwand berühren, da es sonst sofort abkühlen würde. Die Spulen bewirken somit einen „schwebenden“ Zustand des Plasmastromes [13, p. 30ff]. Um die dafür benötigten hohen Feldstärken zu erreichen, werden die Magnetspulen aus supraleitendem Material gefertigt. Dies ist notwendig, damit sie auch für eine

längere Zeit betrieben werden können, ohne dass sie sich wie Spulen aus herkömmlichen Materialien (z.B. Kupfer) durch ihren elektrischen Widerstand zu stark erhitzen. [13, p. 271ff]

Die benötigte Torusform für den Plasmastrom ist allein mit einer einfachen Anordnung von ringförmigen Magneten nicht zu realisieren. Die mit diesen Spulen erzeugte Feldverteilung ist nicht homogen genug, da am äußeren Rand des Torus die Spulen weiter voneinander entfernt sind als in der Mitte und damit das Magnetfeld dort schwächer ist. Das Plasma würde sich permanent in Richtung der Außenseiten bewegen. [9, p. 364ff] Um dem entgegen zu wirken wird mit einer zusätzlichen Spulenanordnung ein poloidales Magnetfeld erzeugt, das senkrecht zu dem toroidalen Feld verläuft. Bei der Überlagerung der Felder ergibt sich im Plasmastrom ein spiralförmiger Feldverlauf. Die Erzeugung des poloidalen Magnetfelds kann auf Basis zweier Prinzipien erfolgen und bildet den Unterschied zwischen den beiden Bauformen Tokamak und Stellarator, die nachfolgend näher erläutert werden.

In dem so erzeugten Plasmastrom findet die eigentliche Fusion aus Deuterium und Tritium zu Helium statt. Die bei der Reaktion entstehenden hochenergetischen schnellen Neutronen sind unabhängig vom umschließenden Magnetfeld und geben 80 % ihrer Energie bei Kontakt mit den Wänden ab. In diese sind Aufprallschichten, sogenannte Blankets, integriert, welche die Neutronen abbremsen und sich dabei erhitzen. Die entstehende Wärmeenergie wird einem angeschlossenen Wasser- bzw. Dampfkreislauf übertragen und zu einer externen Turbine weitertransportiert. An die Turbine ist wie auch in einem konventionellen Kraftwerk ein Generator zur Stromerzeugung gekoppelt. Zusätzlich wird in diesem Generatorkonstruktion in einer sogenannten Brutreaktion neues Tritium hergestellt. Dafür bestehen die Blankets aus einer speziellen flüssigen Blei-Lithium-Legierung. [4, p. 21f]

Tokamak

Im Tokamak wird mittels elektromagnetischer Induktion das poloidale Magnetfeld direkt durch den Plasmastrom erzeugt. Das Plasma stellt dabei die Sekundärwicklung eines Transformators dar. Die toroidalen Spulen umschließen das Plasma ringförmig. Die Überlagerung des poloidalen und des toroidalen Feldes der Ringmagnete ergibt die gewünschte Verdrillung der Magnetfeldlinien und die benötigten Magnetfeldflächen. Durch den ständigen Wechsel von starkem und schwachem toroidalem Feld, je nach Lage innerhalb des Torus, bleibt der Plasmastrom durch die entstehenden Lorentzkräfte in Waage und verläuft auf einer vordefinierten Bahn. Zusätzlich angebrachte Vertikalfeldspulen dienen zur horizontalen Fixierung des Plasmas (siehe Abbildung 3). [9, p. 350] [14]

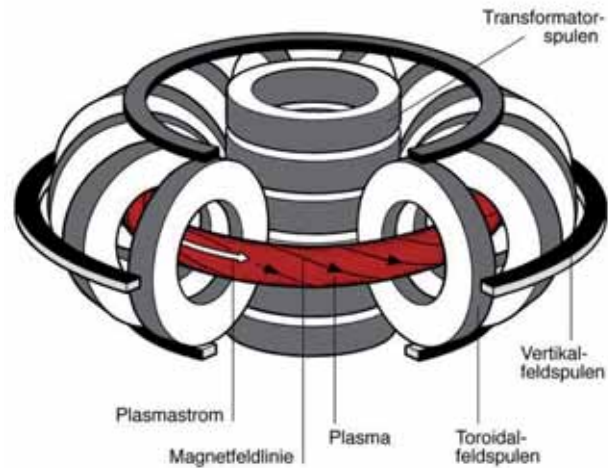


Abbildung 3: Spulensystem und Magnetfeld eines Tokamaks
 (Quelle: IPP, 2019, [<https://www.ipp.mpg.de/9778/tokamak>] (Stand: 28.10.19))

Der Tokamak hat einen streng rotationsymmetrischen Aufbau und besitzt damit die am „einfachsten in sich geschlossene magnetische Einschlusskonfiguration“ (Sibylle Günter, 2010) [12, p. 28]. Alle toroidalen Spulen sind kreisförmig und von gleicher Bauart. So weist zum Beispiel ein Poloidalquerschnitt alle Eigenschaften der anderen auf. Somit können viele Vereinfachungen bei der Konstruktion, Ansteuerung und Wartung getroffen werden. [9, p. 350] [13, p. 271ff] [14]

Der Tokamak wurde erstmals 1952 in der Sowjetunion konzipiert. Der Name setzt sich aus dem russischen Toroidalnaya Kamera Magnitnaya Katuschka („Toroidale Kammer mit Magnetfeldspulen“) zusammen [10, p. 16]. 1968 hatte dieses Konzept seinen Durchbruch mit dem Projekt T3 – Tokamak in Moskau. In diesem Versuchsaufbau wurde erstmals eine Elektronentemperatur von über 2 keV gemessen [9, p. 350].

Das Prinzip des Tokamak hat auch Nachteile. Das induktive Prinzip bedingt ein sich ständig ändernden Primärstrom in der Transformatorspule und somit auch ein sich ändernden Plasmastrom. Da in einem realen Aufbau der Primärstrom begrenzt werden muss, ist eine ständige Erhöhung nicht möglich. Der Transformator muss ausgeschaltet („entladen“) werden, wodurch der Plasmastrom unterbrochen wird. Um das Plasma wieder zu erzeugen und die Kernfusion erneut zu „zünden“, muss die Induktion neu gestartet werden. Deshalb ist beim Tokamak kein kontinuierlicher, sondern nur ein Pulsbetrieb möglich. Momentan wird beim Projekt ITER, ein weiterer Testreaktor des Tokamak-Prinzips (siehe Kapitel 3.3), etwa 15 Minuten Betriebszeit erreicht. Für eine wirtschaftliche Nutzung sind aber mindestens 60-120 Minuten notwendig [13, p. 71ff].

Stellarator

Die notwendige schraubenförmige Verdrillung des poloidalen Magnetfeldes wird im Stellarator durch eine spezielle hochkomplexe Anordnung und Form der Spulen erreicht. Dabei muss kein Plasmastrom wie im Tokamak induziert werden. Die toroidalen Ströme fließen auf der Innenseite des Plasmas entgegen den toroidalen Strömen auf der Außenseite, wodurch die Driftbewegung des Plasmastroms umgangen wird. Die Form der Spulen und der Generatorkonstruktion konnte erst mithilfe von modernen Hochleistungscomputern berechnet werden [12, p. 20]. Die Form und Querschnitte der Spulen bilden gleichartige Sektoren, die modular zusammengesetzt werden können. Die Fertigung, der Transport und der Aufbau dieses Spulensystems muss mit einer sehr hohen Präzision erfolgen, damit die gewünschte Form des Plasmas erreicht werden kann. Dies ist eine der größten Herausforderungen bei der Umsetzung des Stellarator-Prinzips. [13, p. 312ff]

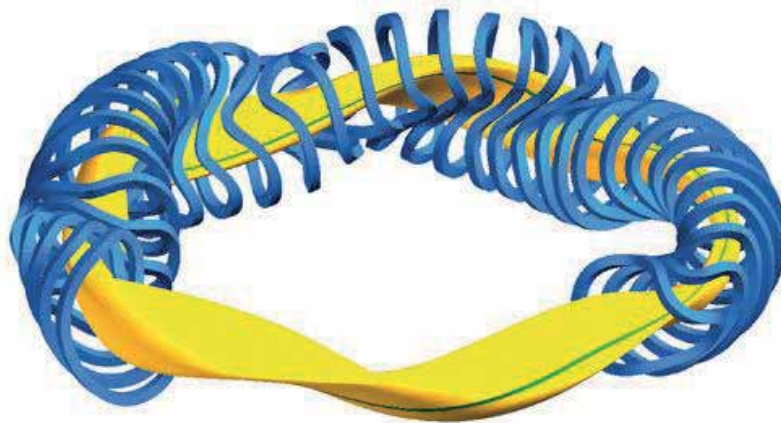


Abbildung 4: Magnetspulen (blau) und Plasma (gelb) des Wendelstein 7-X

(Quelle: IPP, 2010, [https://de.wikipedia.org/wiki/Stellarator#/media/Datei:W7X-Spulen_Plasma_blaue_gelb.jpg])

(Stand: 13.10.19)

Die Theorie des Stellarator-Konzeptes wird seit den 1950er Jahren erforscht. Der Name Stellarator leitet sich aus dem lateinischen Begriff „stella“ (zu Deutsch Stern) ab [15]. Es gab verschiedene Versuche in den USA mit dem Projekt Matterhorn das Prinzip des Stellarators umzusetzen. Erst ab den 1970er Jahren mit der Entwicklung von modularen Spulen und dem besseren Verständnis der Plasmaeigenschaften war es möglich, eine Stellaratoranordnung zu entwickeln, die eine erfolgreiche Umsetzung des theoretischen Konzeptes versprach. Dadurch gab es neues Interesse am Stellarator und auch andere Projekte wie der LHD (Large Helical Device) in Japan und der HSX (Helical Symmetric Experiment) in den USA entstanden [12, p. 19]

[16]. Seitdem wird dieses Prinzip auch in Deutschland mit der Projektserie Wendelstein fortgeführt (siehe Kapitel 4). [9, p. 347f]

Der wesentliche Unterschied zwischen dem Tokamak und dem Stellarator liegt im Aufbau der Spulensysteme. Die Vereinfachungen, wie beim Tokamak oben beschrieben, sind durch die fehlende Rotationssymmetrie nicht im gleichen Maße möglich.

Der Stellarator hat durch den ungepulsten Plasmastrom einen Stabilitätsvorteil gegenüber dem Tokamak. Zusätzlich wird keine Stromquelle für einen poloidalen Plasmastrom benötigt [13, p. 312ff]. Somit fällt bei ihm die Instabilität der äußeren Quelle und die Vertikal- bzw. Abbruchinstabilität weg.

Schon in den 1990er Jahren hielt man den Stellarator für einen geeigneten Fusionsgenerator, obwohl er sehr empfindlich gegenüber Abweichungen zum idealen Aufbau des Spulensystems ist, da diese zu Störungen im Magnetfeld führen. Besitzt er aber perfekte Spulen, so hat der Stellarator vergleichbar gute Einschlusszeiten wie der Tokamak. [9, p. 350]

3.3 Fusionsgenerator – internationale Projekte

Der Tokamak ist das am weitesten entwickelte Konzept der Umsetzung der Kernfusion.

1973 entstand ein gemeinsames europäisches Projekt, der sogenannte JET (Joint European Torus) in Abington bei Oxford. 1983 wurde der bis dahin größte Tokamak auf der Welt in Betrieb genommen mit dem Ziel, Plasmen zu erzeugen, die ähnliche Ergebnisse eines vergleichbaren Fusionsreaktors aufweisen. Mit dem JET-Projekt war es Wissenschaftlern möglich, mit Plasma aus Deuterium und Tritium zu forschen. [9, p. 350] [13, pp. 57-87]

1997 konnte Plasma erzeugt werden, das einer Fusionsleistung von 16 Megawatt entspricht. Hätte man diese Fusionsleistung nutzen können, wären 65% der aufgewandten Leistung zurückgewonnen worden. Somit war der JET eines der erfolgreichsten internationalen Projekte zur Plasmaerzeugung. [12, p. 5]

Als Nachfolgeprojekt begann 2005 das internationale Forschungsprojekt ITER. Neben Europa und den USA sind auch China, Indien, Japan, Südkorea und Russland beteiligt. ITER steht für den International Thermonuclear Experimental Reactor in Cadarache in Frankreich und basiert auf dem Tokamak-Prinzip. Der ITER dient nicht nur zur Forschung, sondern auch zur möglichen Nutzung der Kernfusion als Energiequelle. Das Plasma soll zehnmal so viel Energie erzeugen, wie zum Aufheizen benötigt wird. 2025 soll der ITER erstmals in Betrieb genommen werden und genug Energie aus der Fusionsreaktion freisetzen, sodass die gesamte Heizleistung für die Erzeugung des Plasmas gewonnen wird. [9, p. 350] [12, p. 44]

ITER ist ein Schlüsselexperiment in der Fusionsforschung: „Ist ITER erfolgreich, steht die Tür zum Fusionskraftwerk weit offen.“ (Hartmut Zohm, 2010) [12, p. 47]

Nach dem ITER soll der DEMO als das erste Demonstrationskraftwerk gebaut werden. Sein Ziel wird sein, einen Nachweis auf die Verlässlichkeit der Fusionsenergie zu erbringen und darüber hinaus Strom zu produzieren, sodass man diesen in das Stromnetz einspeisen kann. Er ist demnach keine Experimentieranlage mehr, sondern ein vollständiges Kraftwerk. Bis dahin muss aber das Verständnis über das Plasma, das System und die physikalischen Grundlagen weiter ausgearbeitet sein. Im Moment wird der DEMO noch wie der ITER als Tokamak geplant, jedoch könnte bei weiteren Erfolgen des Stellarators dieses Prinzip eine gute Alternative darstellen. [12, p. 47]

Parallel zu den derzeit laufenden Projekten nach dem Tokamak-Prinzip, wird in Deutschland die Technologie des Stellarators mit der Projektserie Wendelstein erforscht.

4 Fusionsgenerator Wendelstein 7-X: Ein deutsches Forschungsprojekt

4.1 Konzeption und Aufbau

Der weltweit größte Stellarator Wendelstein 7-X, oder kurz W7-X, steht momentan im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik am Standort Greifswald und gilt als Schlüsselexperiment zur Eignung des Stellarator-Prinzips [11].

Der Fusionsgenerator bekam seinen Namen „Wendelstein“ als eine Parallele zu dem geheimen US-Forschungsprojekt „Matterhorn“ in Princeton, welches das erste Fusionsexperiment basierend auf dem Stellarator-Prinzip war. Außerdem deutet der Name auf die „gewendelten“ Magnetfeldspulen. Die Zahl 7 steht für das siebte Reaktorprojekt des Max-Planck-Institutes, das X wurde früher nur als Platzhalter für einen später hinzugefügten Namen eingesetzt, hatte sich jedoch dann eingebürgert. [13, pp. 80-87]

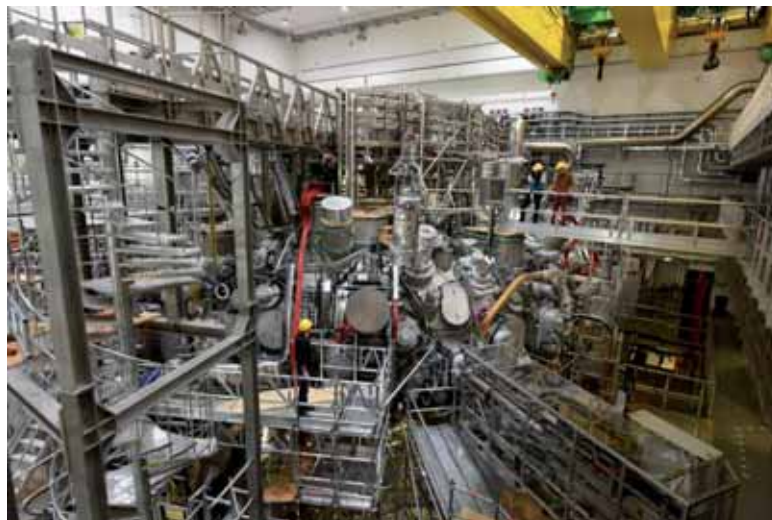


Abbildung 5: Fertiggestellter Wendelstein 7-X

(Quelle: IPP, Torsten Bräuer, 2015, [<https://www.ipp.mpg.de/9342/meilensteine>] (Stand: 28.10.19))

Der W7-X besteht grundsätzlich aus fünf Modulen, die jeweils in Halbmodule geteilt sind. 2005 wurde der Bau der zehn Halbmodule begonnen, die 50 supraleitende Spulen enthalten und an einer Stützkonstruktion befestigt sind. Während der Bauphase wurden die Halbmodule zu einem Vollmodul zusammengeführt und mit einer externen Stromzufuhr und Kühlleitungen fertiggestellt. Alle fünf Module sind mit einer wärmeisolierenden Kryostat-Hülle ummantelt. Der zusammengeschlossene Ring wurde schon 2011 als Grundbau vollendet (siehe Abbildung 5). Parallel dazu wurde das Innere des Torus ausgebaut und durch weitere technische Geräte wie die Plasmaheizungen, eine elektrische Energieversorgung sowie die Kühlung, die

Maschinensteuerung und Messgeräte ergänzt. Die Hauptmontage wurde im Mai 2014 beendet, die Testphase dann Ende 2015. Der W7-X benötigte neun Jahre Bauzeit und ein Jahr Tests, bevor die Forschungsarbeiten starten konnten. [17] [18] [19]

4.2 Entwicklungsweg und Meilensteine

Auf der 2. Internationalen Atomkonferenz in Genf 1958 wurde erstmalig über die Fortschritte der Fusionsforschung berichtet. Bis zu diesem Zeitpunkt wurden die Forschungsergebnisse in den Ländern geheim gehalten. 1960 wurde in Deutschland das Institut für Plasmaphysik (später: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik oder kurz IPP) als Forschungszentrum für Kernfusion gegründet. Schwerpunkt war die Forschung am Stellarator-Prinzip und zusätzlich an Pinch-Experimenten, ein anderes weniger bewährtes Einschlussverfahren der Kernfusion. [13, pp. 80-87]

Kurz nach der Gründung des IPP entstand der Wendelstein 1-A. Sein Ziel und auch das seines Nachfolgers Wendelstein 1-B war die Untersuchung des Einschlussverhaltens der Plasmen. Dabei stellte sich heraus, dass eine „rennbahnförmige“ Anordnung (geradlinige Stücke führen zu halbkreisförmigen Gefäßen) nachteilig ist.

Mit den darauffolgenden Projekten, dem Wendelstein 2-B wurde die torusförmige Anordnung untersucht. Außerdem wurde erstmals an Wasserstoffplasmen geforscht. Durch das Einsetzen der Mikrowellen als Aufheizung konnten Stellaratoren schon 1975 mit Tokamak-Generatoren konkurrieren. Die nächsten Experimente in der Wendelsteingeneration waren keine „klassischen“ Stellaratoren, sie sollten nur die Bauform eines Stellarators testen. Erst mit dem Wendelstein 7-1 hat das IPP einen neuen Test-Stellarator konstruiert. Dieser hatte nun drei Möglichkeiten, das Plasma zu erhitzen: Die Stromheizung, die Mikrowellenheizung und die Heizung mit neutralen energiereichen Teilchenstrahlen. 1980 konnte mit dem Wendelstein 7-1 das erste Mal der Einschluss ohne Plasmastrom gezeigt werden. Die Schlüsselrollen spielen hierbei die modularen Spulen, deren gekrümmte Form das torusförmige Feld und deren Verdrillung erzeugen. Im selben Jahr wurde bereits der W7-X geplant. Mit dem Wendelstein 7-AS (AS= „Advanced Stellarator“) entstand zwischenzeitlich der erste optimierte Stellarator. Bei diesem wurde das Gleichgewicht des Plasmas verbessert, sodass der Plasmadruck belastbarer ist. Es konnte die Praxistauglichkeit der Spulen gezeigt und sogar Rekordmesswerte erzielt werden.

1996 hat das IPP die Baugenehmigung für den vollständig optimierten Wendelstein 7-X bekommen. Vor allem in Bezug auf den magnetischen Einschluss schneller Plasmateilchen wurde dieser Generator verbessert. Auch bestehen seine Spulen erstmals aus supraleitendem

Material. Das Richtfest des W7-X war am 24. August 1998, jedoch konnte erst 2015 an dem Generator nach Bau- und Testphase mit der Forschung begonnen werden. Ab Februar 2016 konnte erstmals ein Wasserstoff-Plasma gebildet werden. Im Dezember 2017 hat das Projekt den Stellarator-Weltrekord gebrochen, er hatte das bis dahin größte Fusionsprodukt (aus der längsten Einschlusszeit, der höchsten Ionentemperatur und höchsten Plasmadichte) erreicht (vgl. Abbildung 6). [12, pp. 12-17] [20]

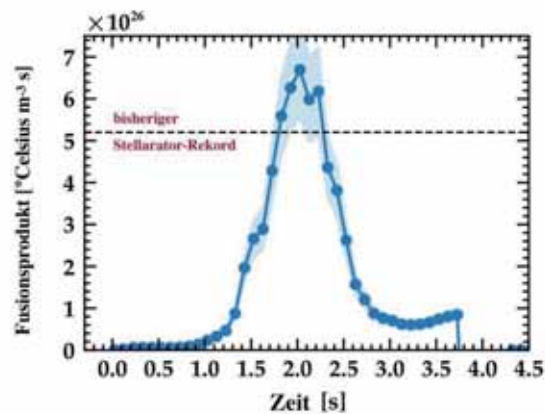


Abbildung 6: Stellarator Weltrekord 2017 für das Fusionsprodukt (Ionentemperatur, Plasmadichte, Energieeinschlusszeit)

(Quelle: IPP, 2017, [https://www.ipp.mpg.de/de/aktuelles/presse/pi/2018/04_18] (Stand: 28.10.19))

Rebhan hat in seinem Buch „Heißer als das Sonnenfeuer“ die Bedeutung des Projekts für die Fusionsforschung gut getroffen: „Man kann sagen, [dass] die konsequente Verfolgung der Stellaratorlinie am Garching Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und die dort erzielten großen Erfolge zu einer Renaissance des Stellarators geführt haben.“ (Eckhard Rebhan, 1992) [13, p. 323]

4.3 Ziele des Forschungsprojekts

Hauptziel des Forschungsprojektes ist der Nachweis der Eignung des Stellarator-Prinzips zur klima- und umweltfreundlichen Energiegewinnung [18]. Außerdem soll das Projekt auch die wirtschaftlichen Möglichkeiten des Stellarators im Vergleich zum Tokamak zeigen. Am W7-X selbst wird es keine Energieproduktion geben, er bildet aber die Grundlage für einen effizienten und wirtschaftlichen Fusionsreaktor. Bei weiteren positiven Forschungsergebnissen könnten die Erkenntnisse aus W7-X die Basis für den Einsatz des Stellarators für ein erstes Kernfusionskraftwerk im Projekt DEMO sein. [19]

5 Kernfusion als Lösungsansatz für das Energieproblem

Zukünftig wird sowohl die Weltbevölkerung als auch die Industrieproduktion weiter ansteigen, was mit einem wachsenden Energiebedarf einhergeht. Da dieser mit zurzeit genutzten Energiequellen nicht zu decken ist, spricht man von einer Versorgungslücke und dementsprechend von einem Energieproblem.

Neue Technologien müssen in allen Bereichen der Energiegewinnung erforscht werden. Dabei gilt es, die fossilen Energieträger aufgrund deren Ressourcenknappheit und deren umweltschädliche Aspekte zu vermeiden. Allerdings werden regenerative Energiequellen das Energieproblem allein nicht lösen können. Ohne den Beitrag von Kernenergie wird es voraussichtlich nicht gelingen, diese Versorgungslücke zu schließen.

Die herkömmliche Nutzung der Kernenergie erfolgt durch die Kernspaltung. Diese bringt allerdings hohe Risiken bei Betrieb und Endlagerung der Abfallprodukte mit sich. Die Kernfusion wird als eine Alternative zur Kernspaltung gesehen. In den letzten Jahren konnten bei der Erforschung dieser Technologie vielversprechende Ergebnisse erzielt werden. Es haben sich zwei verschiedene Prinzipien, der Tokamak und der Stellarator, zur Umsetzung der Kernfusion etabliert. Am Tokamak-Prinzip wurde in den letzten Jahrzehnten deutliche Fortschritte erzielt, sodass bereits Testreaktoren entwickelt wurden, die Energie erzeugen könnten. Das in der Realisierung technologisch komplexere Stellarator-Prinzip ist in der Forschung zwar noch nicht so weit fortgeschritten wie der Tokamak, weist ihm gegenüber aber durch seine stabile kontinuierliche Arbeitsweise signifikante Vorteile auf. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass auch in den nächsten Jahrzehnten mit einem Fusionsreaktor auf Basis eines Stellarators real Energie gewonnen werden kann.

Gelingt es aber in den nächsten Jahren, diese Technologien weiter zu entwickeln und wirtschaftlich umzusetzen, so kann das große Potential der Kernfusion zur Energieerzeugung genutzt werden. Das Energieproblem würde gelöst werden, denn dann könnte bildlich gesehen „[eine] Badewanne voll Wasser und das Lithium einer gebrauchten Batterie [...] eine Familie 50 Jahre mit Strom versorgen.“ (Günther Hasinger, 2010) [12, p. 5]

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Primärenergieverbrauch nach Energieträgern und Anteil der Primärenergie (Quelle: bp Energy Outlook, 2019 [https://www.bp.com/de_de/germany/home/presse/energie-analysen/energy-outlook/ausgewaehlte-grafiken-zum-energy-outlook.html] (Stand: 28.10.19))	.4
Abbildung 2: Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium (Quelle: IPP, [https://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/fusion21/kernfusion/index#] (Stand: 28.10.19))7
Abbildung 3: Spulensystem und Magnetfeld eines Tokamaks (Quelle: IPP, 2019, [https://www.ipp.mpg.de/9778/tokamak] (Stand: 28.10.19)) 11
Abbildung 4: Magnetspulen (blau) und Plasma (gelb) des Wendelstein 7-X (Quelle: IPP, 2010, [https://de.wikipedia.org/wiki/Stellarator#/media/Datei:W7X-Spulen_Plasma_blaugelb.jpg] (Stand: 13.10.19)) 12
Abbildung 5: Fertiggestellter Wendelstein 7-X (Quelle: IPP, Torsten Bräuer, 2015, [https://www.ipp.mpg.de/9342/meilensteine] (Stand: 28.10.19)) 15
Abbildung 6: Stellarator Weltrekord 2017 für das Fusionsprodukt (Iontemperatur, Plasmadichte, Energieeinschlusszeit) (Quelle: IPP, 2017, [https://www.ipp.mpg.de/de/aktuelles/presse/pi/2018/04_18] (Stand: 28.10.19)) 17

Literaturverzeichnis

- [1] OECD und N. E. Agency, „Kernenergie heute,“ Paris, 2003.
- [2] K. G. Bauer, „Die Rolle der Kernenergie,“ in *Energieversorgungskonzepte im 21. Jahrhundert*, Bonn, 2002.
- [3] B. f. W. u. Energie, „Aktuelle Informationen: Erneuerbare Energien im Jahr 2018,“ 2019. [Online]. Available: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Aktuelle-Informationen/aktuelle-informationen.html. [Zugriff am 28. Oktober 2019].
- [4] G. Franceschini und M. Englert, „Safeguarding Fusion Reactors - Plädoyer für eine proliferationsresistente Gestaltung der Kernfusion,“ *HSFK-Report*, 2013.
- [5] J. Fassbender, Einführung in die Reaktorphysik, München: Karl Thiemig KG, 1967.
- [6] G. Schmidt, Problem Kernenergie: eine kritische Information, Braunschweig: Vieweg, 1977.
- [7] M. Lersow, Endlagerung aller Arten von radioaktiven Abfällen und Rückständen: Langzeitstabile, langzeitsichere Verwahrung in Geotechnischen Umweltbauwerken – Sachstand, Diskussion und Ausblick, Breitenbrunn/Erzgebirge: Springer-Verlag, 2018.
- [8] Max-Planck-Gesellschaft, „Was ist Kernfusion?,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/fusion21/kernfusion/index.html>. [Zugriff am 28. Oktober 2019].
- [9] U. Stroth, Plasmaphysik: Phänomene, Grundlagen und Anwendungen, Stuttgart: Springer Spektrum, 2018.
- [10] P. Fahner, „Plasmaphysik und Kernfusion,“ Heidelberg, 2012.

- [11] Max-Planck-Gesellschaft, „Richtfest im IPP-Teilinstitut Greifswald,“ 20. August 1998. [Online]. Available: https://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/presse/archiv/08_98_pi. [Zugriff am 28. Oktober 2019].
- [12] Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 50 Jahre Forschung für die Energie der Zukunft, München: FIBO Druck- und Verlags GmbH, 2010.
- [13] E. Rebhan, Heißer als das Sonnenfeuer, München: Piper, 1992.
- [14] Max-Planck-Gesellschaft, „Der Tokamak,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.ipp.mpg.de/9778/tokamak>. [Zugriff am 28. Oktober 2019].
- [15] B. I. GmbH, „Duden.de,“ Dudenverlag, [Online]. Available: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Stellarator>. [Zugriff am 28. Oktober 2019].
- [16] Max-Planck-Gesellschaft, „Japanische Fusionsanlage LHD in Betrieb gegangen,“ 31. März 1998. [Online]. Available: https://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/presse/archiv/03_98_pi. [Zugriff am 28. Oktober 2019].
- [17] Max-Planck-Gesellschaft, „Im Zeitraffer: Zusammenbau von Wendelstein 7-X,“ 2019. [Online]. Available: https://www.ipp.mpg.de/115632/zeitraffer_w7x. [Zugriff am 28. Oktober 2019].
- [18] Max-Planck-Gesellschaft, „Wendelstein 7-X,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.ipp.mpg.de/wendelstein7x>. [Zugriff am 28. Oktober 2019].
- [19] Max-Planck-Gesellschaft, „Erstes Plasma: Fusionsanlage Wendelstein 7-X in Betrieb gegangen,“ 10 Dezember 2015. [Online]. Available: https://www.ipp.mpg.de/de/aktuelles/presse/pi/2015/12_15. [Zugriff am 28. Oktober 2019].
- [20] Max-Planck-Gesellschaft, „Meilensteine,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.ipp.mpg.de/9342/meilensteine>. [Zugriff am 28. Oktober 2019].

Erklärung zur selbstständigen Anfertigung

Ich erkläre hiermit, dass ich meine Seminararbeit ohne fremde Hilfe angefertigt habe und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.

....., den

Ort

Datum

Unterschrift des Schülers/der Schülerin