

Der Stellarator - Ein alternatives Einschlusskonzept für ein Fusionskraftwerk

Robert Wolf, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, EURATOM Assoziation, Teilinstitut Greifswald

Kernfusion

Die Energieerzeugung in der Sonne und den Sternen beruht auf der Fusion leichter Atomkerne. Um Atomkerne zu verschmelzen muss aber erst die Coulombabstoßung der positiv geladenen Kerne überwunden werden. Dies erfordert sehr hohe Energien der stoßenden Atomkerne. Eine positive Energiebilanz ist dabei allerdings nur möglich, wenn die Atomkerne eine hinreichend hohe Anzahl von Stößen durchführen, bevor sie das System verlassen. Zusammengenommen bedeuten diese beiden Forderungen – hohe Energien und genügend Stöße –, dass Energiegewinnung mit Fusion nur möglich ist, wenn es sich um ein System handelt, welches sich näherungsweise im thermodynamischen Gleichgewicht mit einer hinreichend hohen Temperatur befindet. Die Fusionsreaktion zwischen den Wasserstoffisotopen Deuterium und Tritium ist diejenige, die bei der niedrigsten Temperatur und dem niedrigsten Druck abläuft. Die Fusionsprodukte sind Helium und ein Neutron. Das Maximum der Reaktionsrate liegt bei Temperaturen zwischen 10 und 20 keV (entspricht etwa 100 Mio. K). Der erforderliche Druck ist nur einige wenige bar. Das frei werdende Neutron wird dazu verwendet, aus Lithium Tritium zu erbrüten. Da Tritium nicht stabil ist und mit einer Halbwertszeit von 12,3 Jahren zerfällt, muss es in diesem geschlossenen Kreislauf in dem Maße erzeugt werden wie es wieder verbraucht wird.

Magnetischer Einschluss

Heizt man ein Gas soweit auf, dass die elektrisch neutralen Atome ionisiert werden – d.h. den Elektronen in der Atomhülle wird so viel Energie zugeführt, dass sie diese verlassen können –, spricht man von einem Plasma. Bei den für die Fusion notwendigen Temperaturen von 100 Mio. K sind leichte Atome vollständig ionisiert, es liegen also nur Elektronen und Atomkerne vor. Das Prinzip des magnetischen Einschlusses beruht auf der Eigenschaft elektrischer Ladungen sich nur entlang eines Magnetfeldes frei bewegen zu können und senkrecht dazu auf Kreisbahnen gezwungen zu werden. Senkrecht zu den Magnetfeldlinien wirkt das Magnetfeld wie eine Wärmeisolierung. Führt man dem Plasma nun mehr Energie zu als über Wärmeleitung, Konvektion und Abstrahlung verloren geht, können die für die Fusion notwendigen Temperaturen erreicht werden. Setzt die Fusion ein, übernimmt das entstehende Helium die Heizung des Plasmas, welches etwa ein Fünftel der Energie der Fusionsreaktion in sich trägt. Vier Fünftel werden über die Neutronen gleichmäßig in den das Plasma umgebenden Wandstrukturen verteilt und können dort durch

Kühlung abtransportiert werden. Die Forderung, dass das entstehende Helium das Plasma heizt, bedeutet allerdings, dass das Magnetfeld nicht nur die 10 bis 20 keV heißen Deuterium- und Tritiumionen einschließen muss, sondern auch die 3,5 MeV schnellen Heliumionen, zumindest bis sie ihre Energie an das thermische Plasma abgegeben haben.

Wegen der unvermeidbaren Endverluste kann ein magnetisch eingeschlossenes Fusionsplasma in einer linearen Anordnung nicht verwirklicht werden. Deshalb muss das Magnetfeld einen geschlossenen Torus bilden. Mit einem rein toroidalen Magnetfeld lässt sich allerdings keine Kräftegleichgewicht erreichen, da wegen der variierenden Magnetfeldstärke Driften zu einer radialen Beschleunigung des Plasmas führen. Erst durch Einführung von verschraubten Feldlinien, die auf toroidalen Oberflächen liegen, lässt sich eine Gleichgewichtskonfiguration erreichen. Man spricht hier von der Rotationstransformation des Magnetfeldes. Es gibt nun zwei Möglichkeiten solche Magnetfeldlinien zu erzeugen. Entweder ein toroidaler Plasmastrom oder helikal verschraubte Magnetfeldspulen erzeugen die notwendige poloidale Magnetfeldkomponente. Abbildung 1(a) zeigt einen Tokamak. Das Plasma bildet die Sekundärwindung eines Transformators, in dem der starke Plasmastrom fließt. Aufgrund der hohen elektrischen Leitfähigkeit des Plasmas können dort problemlos Ströme im Bereich mehrerer Megaampere fließen. Allerdings bedingt die induktive Erzeugung, dass ein solches System zunächst nur gepulst funktioniert. Um einen Tokamak stationär zu betreiben, muss der Plasmastrom durch nicht-induktive Methoden erzeugt werden. Dieses ist zwar bereits gelungen, aber für ein Fusionskraftwerk noch nicht effizient genug. Ein wichtiges Thema der derzeitigen Forschung ist deshalb diese Effizienz zu erhöhen und den Anteil des vom Plasma selbst erzeugten sogenannten Bootstrap-Stroms zu maximieren. Dieser entsteht als Folge der komplexen Teilchenbahnen in der toroidalen Magnetfeldanordnung zusammen mit der Diffusion der Teilchen aufgrund des Druckgradienten, wodurch zwischen Ionen und Elektronen eine Nettogeschwindigkeitsdifferenz entsteht. Der wesentliche Vorteil des Stellarators ist, dass das einschließende Magnetfeld von vornherein stationär ist. Der magnetische Einschluss kommt ohne Plasmastrom aus. Allerdings bedarf es Spulen mit einer helikalen Komponente. Daraus folgt auch, dass die im Tokamak vorhandene toroidale Symmetrie der Konfiguration nicht aufrecht erhalten werden kann. In Bild 1(b) ist dies daran zu erkennen, dass die Oberflächen, auf denen die Magnetfeldlinien verlaufen, selbst verschraubt sind.

Das Stellaratorkonzept

Historisch gesehen ist der Stellarator das ältere Konzept. Er wurde 1951 von dem amerikanischen Astro- und Plasmaphysiker Lyman Spitzer erfunden. Allerdings stellte sich schnell heraus, dass die grundlegenden Einschlusseigenschaften mit diesem Konzept nicht so einfach zu erreichen waren. Zudem führten die frühen Erfolge des Tokamaks dazu, dass sich die Fusionsforschung auf die Tokamakkonfiguration konzentrierte. Bereits 1969 konnten im Tokamak T3 am Kurchatov Institut in Moskau Temperaturen von 10 MK nachgewiesen werden [N. J. Peacock, D.C. Robinson, M. J. Forrest, P. D. Wilcock, Nature 224 (1969) 488]. Die Entdeckung eines verbesserten Einschlussregimes am Tokamak ASDEX 1982 [F. Wagner et al., Phys. Rev. Lett. 49 (1982) 1408] und die Erfolge des bisher größten Tokamakexperiments Joint European Torus [A. Gibson et al. Phys. Plasmas 5 (1998) 1839] führten schließlich dazu, dass ITER, das erste Fusionsexperiment, welches

auf Basis des magnetischen Einschlusses eine brennendes Fusionsplasma mit einem deutlichen Energieüberschuss nachweisen soll (zehnmal mehr Fusionsleistung als zugeführte Heizleistung), ein Tokamak ist [www.iter.org].

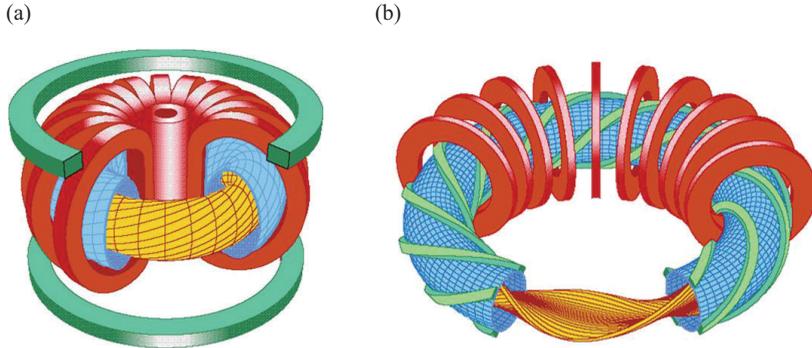


Abbildung 1: (a) Im Tokamak erfolgt die helikale Verschraubung der Magnetfeldlinien mit Hilfe eines in toroidaler Richtung fließenden Plasmaström. Zusammen mit dem toroidalen Magnetfeld der (roten) Spulen entstehen die verschraubten Magnetfeldlinien (schwarz), deren Verlauf auf der (gelben) – magnetischen – Oberfläche angedeutet ist. (b) Der Stellarator kommt ohne Plasmaström aus. Hier wird das verschraubte Magnetfeld durch entsprechend verschraubte Spulen erzeugt (grün).

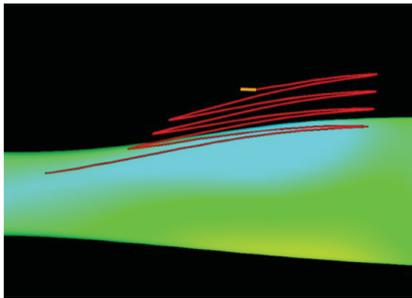
Der Stellarator vereint die Vorteile einer intrinsisch stationären Magnetfeldanordnung mit einem gutmütigen Stabilitätsverhalten. Die Abwesenheit des starken Plasmaströms, der im Tokamak für die den magnetischen Einschluss notwendig ist, bedeutet, dass auch die von Stromgradienten getriebenen Plasmaintabilitäten nicht vorhanden sind. Dies führt im Allgemeinen dazu, dass Stellaratoren ohne Regelungsaufwand nahe an Betriebsgrenzen arbeiten können. Die 3-dimensionale Anordnung verlangt allerdings deutlich komplexeren Geometrien der Spulen, des Plasmagefäßes und der Komponenten im Plasmagefäß, die die Wärme- und Teilchenflüsse vom Plasma aufnehmen müssen. Zudem verkomplizieren sich die Bahnen der Plasmateilchen, wodurch sich der Einschluss sowohl des thermischen Plasmas als auch der schnellen Heliumionen verschlechtert. Nur die gezielte Formung des Magnetfeldes – auch Stellaratoroptimierung genannt – kann diese Nachteile vermeiden. In einem aufwändigen Prozess wird dabei ein Kompromiss zwischen hinreichend gutem Einschluss, Vermeidung von unerwünschten Teilchendiffusions und Erhalt der Gleichgewichtskonfiguration und ausreichende Plasmastabilität bei Drücken, die für ein Fusionskraftwerk notwendig sind, gesucht. Für die Stellaratoroptimierung werden Computercodes verwendet, die nur auf Hochleistungsrechnern laufen. Während in Tokamaks bereits früh die grundlegenden Einschlusseigenschaften, die für ein brennendes Fusionsplasma notwendig sind, empirisch nachgewiesen werden konnten und die Basis für

den Bau ITER bilden, konnte eine solche Entwicklung bei Stellaratoren deshalb erst mit der Einführung von Supercomputern begonnen werden. Wendelstein 7-X, der derzeit in Greifswald gebaut wird, ist dabei weltweit der erste Stellarator, dessen Design konsequent von Optimierungskriterien abgeleitet wurde.

Stand der Forschung

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Tokamak und Stellarator besteht im Einschluss des thermischen Plasmas. Im Tokamak wird der Transport senkrecht zu den Magnetfeldlinien über weite Teile des Plasmas von turbulenten Prozessen bestimmt. Der durch binäre Coulombstöße zwischen den geladenen Plasmateilchen verursachte Transport ist deutlich geringer. Die starke Modulation des Magnetfeldes im Stellarator führt dagegen zu einer deutlichen Erhöhung dieses stoßbedingten Transports. Ausgedrückt in Abhängigkeit der Temperatur des Plasmas, T , und des effektiven Rippels, ϵ_{eff} , welcher die Stärke der Magnetfeldmodulation beschreibt, skaliert der Diffusionskoeffizient wie $\epsilon_{\text{eff}}^{3/2} T^{7/2}$. Um in einem Fusionsplasma, welches Temperaturen oberhalb 10 keV erreichen muss,

(a)



(b)

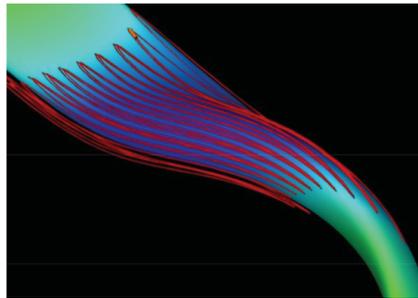


Abbildung 2: (a) Teilchenbahn eines 75 keV Deuteriumions in Wendelstein 7-AS, dem Vorgängerexperiment von Wendelstein 7-X. Hier ist deutlich zu erkennen, wie sich das Teilchen radial von der eingezeichneten magnetischen Fläche entfernt. Die Farbcodierung steht für die Magnetfeldstärke (zunehmendes Magnetfeld von blau über grün nach gelb). (b) Im driftoptimierten Wendelstein 7-X pendelt das Ion zwar auch zwischen Bereichen hoher Magnetfeldstärke, allerdings vollführt es lediglich eine poloidale Präzession aus und bleibt somit im Plasma.

den Transport niedrig zu halten, bleibt deshalb nur die Möglichkeit die Magnetfeldmodulation zu minimieren. Dieses wird erreicht durch die Einführung sogenannter Quasisymmetrien. Dabei wird versucht, entlang einer vorgegebenen Koordinate die Magnetfeldmodulation so klein wie möglich zu halten. Je nach Wahl der Koordinate spricht man von quasi-helikale, quasi-poloidal oder quasi-toroidal symmetrischen Stellaratoren. An dem Stellaratorexperiment HSX an der Universität von Madison,

Wisconsin in den USA wurde die Wirkung der Quasisymmetrie bereits nachgewiesen [J. M. Canik et al., Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 085002]. Die quasi-helikale Konfiguration benötigte für das Erreichen eines bestimmten Plasmadrucks nur etwa die halbe Heizleistung wie die Konfiguration, die diese Symmetrie nicht aufwies.

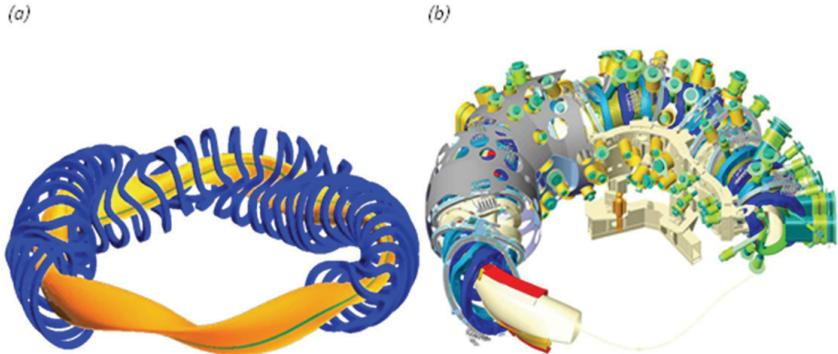


Abbildung 3: (a) Anordnung nicht-planarer Spulen von Wendelstein 7-X. Gezeigt ist zudem die Plasmaoberfläche und exemplarisch eine Magnetfeldlinie (in grün). (b) Schematisches Bild von Wendelstein 7-X. Von innen nach außen folgen nPlasma, Divertortargets, Plasmagefäß, Spulen mit ringförmiger Stützstruktur, Kryostatgefäß und Stützen für die Verbindung zwischen Plasmagefäß und Umgebung. Die Stützen werden für das Abpumpen des Plasmagefäßes, die Heizung des Plasmas, die Kühlung der Wandstruktur und für die Diagnostik des Plasmas benötigt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der Einschluss schneller Ionen. Die Bahnen von Ionen mit Energien signifikant oberhalb der Energie der Teilchen des thermischen Plasmas unterscheiden sich deutlich von der einfachen Gyrationbewegung um die Magnetfeldlinien. Während diese Bahnen im Tokamak jedoch geschlossen sind – vorausgesetzt das Magnetfeld ist stark genug bzw. die Plasmavolumen ist groß genug – driften diese Ionen im nicht optimierten Stellarator aus dem Plasmavolumen heraus. Das liegt auch daran, dass ihre mittlere freie Weglänge so groß ist, dass der Energieverlust durch Stöße nicht ausreicht, um den Ionenverlust bzw. den damit verbundenen Energieverlust klein genug zu halten. Ein Ziel der Stellaratoroptimierung ist deshalb diesen grundsätzlichen Nachteil des Stellarators zu vermeiden, indem die Driftbahnen so modifiziert werden, dass die Ionen im Plasmavolumen verbleiben, bis sie ihre Energie an das thermische Plasma abgegeben haben. Im Fall von Wendelstein 7-X wurde für die Driftoptimierung eine sogenannte isodynamische Anordnung gewählt, in welcher die Teilchen anstatt sich radial aus dem Plasma heraus zu bewegen eine poloidale Präzession durchführen [J. Nührenberg, Europhysics News November/December 1998, 216]. In

Abbildung 2 ist eine solche Teilchenbahn gezeigt [E. Strumberger, Nucl. Fusion 40 (2000) 1697], und im Vergleich dazu auch die Bahn wie sie im nur teiloptimierten Stellarator Wendelstein 7-AS [M. Hirsch et al., Plasma Phys. Control. Fusion 50 (2008) 053001] aussieht.

Neben hinreichend guter thermischer Isolierung des Plasmas und dem Einschluss schneller Ionen muss in einem Fusionskraftwerk auch die Wärme und Teilchenabfuhr funktionieren. Das Plasma kann nur stationär brennen, wenn entstehende und von außen zugeführte Energie und Plasmateilchen, die nicht im Fusionsprozess umgesetzt werden, kontinuierlich abgeführt werden. In Tokamaks und Stellaratoren haben sich dazu sogenannte Divertoren bewährt, die Bereiche offener Magnetfeldlinien bilden, welche die aus dem Plasma kommenden Teilchen gezielt auf dafür vorgesehenen Targets leiten. Die dabei auftretenden stationären Wärmeflüsse liegen im Bereich von 10 MW/m^2 . Die in Wendelstein 7-X verwendete Divertoranordnung beruht auf der Nutzung resonanter Magnetfeldstrukturen, die natürlicherweise in der Plasmarandschicht auftreten. Resonant bedeutet hier, dass diese Strukturen nur bei einem bestimmten Wert der Rotationstransformation auftreten. Diese Art des Divertors bedeutet allerdings, dass Plasmaströme, die die Magnetfeldstruktur verändern können, vermieden werden müssen.

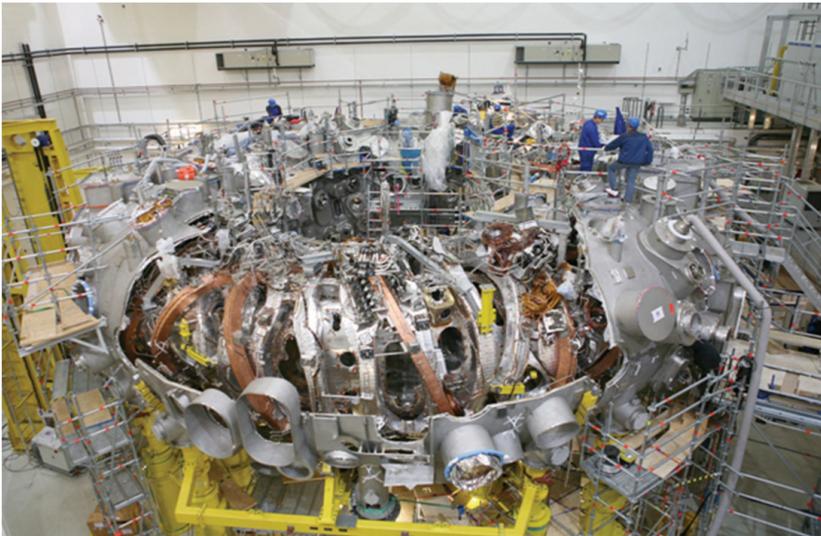


Abbildung 4: Ansicht von Wendelstein 7-X (Stand November 2011). Zu sehen ist der die toroidale Form des Kryostatgefäßes, in dem sich die supraleitenden Spulen und innerhalb der Spulen das Plasmagefäß befinden. Dem Modul im Vordergrund fehlt noch der obere Teil des Kryostatgefäßes.

Wendelstein 7-X

Die in den vorangegangenen Abschnitten diskutierten Eigenschaften des Stellarators und die daraus abgeleiteten Forderungen, um aus ihm ein kraftwerkstaugliches Einschlusskonzept zu machen, bilden die Grundlage für das Design von Wendelstein 7-X. Zusammengefasst sind das die Verbesserung des magnetischen Einschlusses – für das thermische Plasma und die schnellen Ionen gleichermaßen –, die Stabilität bei hinreichend hohem Plasmadruck, der Erhalt der einschließenden Magnetfeldkonfiguration auch bei zunehmendem Plasmadruck und schließlich ein tragfähiges Konzept für die Teilchen- und Energieabfuhr. Für die Realisierung der letzten beiden Punkte verlässt sich Wendelstein 7-X auf die weitgehende Vermeidung von Plasmaströmen, die sich mit zunehmendem Plasmadruck bilden und somit das von den externen Spulen erzeugte Magnetfeld verändern. So gesehen ist Wendelstein 7-X die rigoroseste Umsetzung eines Stellarators, welcher das Plasma weitestgehend vom einschließenden Magnetfeld entkoppelt. Im Tokamak sind Plasma und einschließendes Magnetfeld dagegen über den Plasmastrom, welcher einen Teil des einschließenden Magnetfelds erzeugt, direkt gekoppelt.

Die meisten Stellaratoren, die bisher gebaut wurden, verwenden helikale Spulen (siehe Abbildung 1(b)). Die gezielte Formung des Magnetfeldes erfordert jedoch eine viel flexiblere Spulenanordnung. Deshalb verwendet Wendelstein 7-X nicht-planare Spulen, die individuell eine poloidale und toroidale Magnetfeldkomponente erzeugen (Abbildung 3(a)). Zudem ergibt sich daraus der Vorteil keine großen helikalen Spulen wickeln zu müssen. Allerdings bedarf es sehr starker Stützstrukturen, da nicht-planaren Spulen vergleichsweise große Kräfte verursachen.

70 supraleitende Spulen formen das Magnetfeld von Wendelstein 7-X. Davon sind 50 nicht-planar und für den Einschluss des Plasmas verantwortlich. 20 planare Spulen übernehmen die Kontrolle der radialen Position des Plasmas und können zudem die Rotationstransformation verändern. Die Spulenanordnung besteht aus fünf gleichen Modulen, die zusammen das toroidale geschlossen Magnetfeld bilden. Der große Radius der toroidalen Anlage beträgt 5,5 m, der poloidale Durchmesser des Plasmas im Mittel etwa 1,1 Meter, woraus sich ein Plasmavolumen von 30 m^3 ergibt. Wendelstein 7-X ist ausgelegt für den stationären Plasmabetrieb. Tritium soll jedoch nicht verwendet werden, da die Anlage nicht groß genug ist und das Magnetfeld (von bis zu 3T) nicht stark genug ist, um ausreichend Fusionsleistung zu erzeugen. Fusionsrelevante Temperaturen und Drücke werden deshalb durch die kontinuierlich zugeführte Heizung des Plasmas aufrecht erhalten (Größenordnung 10 MW). Sowohl der normierte Plasmadruck (das Verhältnis zwischen kinetischem Plasmadruck und Magnetfelddruck) als auch die Wärmeflüsse auf die Divertortargets liegen dabei in kraftwerksrelevanten Bereichen. Inzwischen befindet sich Wendelstein 7-X in der Endphase der Montage, welche 2014 abgeschlossen sein wird. Der Beginn des wissenschaftlichen Programms ist 2015 nach einer einjährigen Inbetriebnahme geplant.

Ein Stellarator als Fusionskraftwerk

Extrapoliert man von Wendelstein 7-X zu einem Fusionskraftwerk, so sind etwa das doppelte Magnetfeld und der drei- bis vierfache Radius (18 – 22 m) notwendig, um ein gezündetes Plasma zu erreichen [C. Beidler et al., Nuclear Fusion 41 (2001) 1759; R. C.

Wolf et al., Fusion Engineering and Design 83 (2008) 990]. Das favorisierte Konzept ist eine um ein Magnetmodul reduzierte Anordnung mit einem großen Radius von 18 m. Sie stellt derzeit den besten Kompromiss aus reduzierter Größe, Verringerung der Zahl der Spulen und ausreichend guten Einschlusseigenschaften dar. Die Größe berücksichtigt auch den Platz für das das Plasma umgebende Blanket, in dem die Neutronen absorbiert werden und diese aus Lithium Tritium erbrüten. Der Querschnitt des Plasmas und der der umgebenden Spulen entsprechen etwa dem poloidalen Querschnitt von ITER. Erste Untersuchungen zeigen, dass lediglich in der Form modifizierte ITER-Spulen geeignet wären so einen Stellarator zu bauen [F. Schauer et al., Contrib. Plasma Phys. 50 (2010) 750].

Für ein Stellaratorkraftwerk sind grundsätzlich auch andere Optimierungsstrategien denkbar. Amerikanische Studien haben einen kompakten Stellarator untersucht [A. R. Raffray et al., Fusion Science and Technology 54 (2008) 725], der eine quasi-toroidale Symmetrie aufweist und den vom Plasmadruck generierten Bootstrapstrom maximiert, anstatt wie bei Wendelstein 7-X Plasmaströme möglichst klein zu halten.

Für die technische Weiterentwicklung des Stellarators ist besonders wichtig, passende Konzepte für das Blanket und die Wartung der im Plasmagefäß befindlichen und aktivierten Komponenten zu finden. Während die grundlegenden Prinzipien der Blankettechnologie vom Tokamak übernommen werden können und in ITER erstmals Blanketmodule getestet werden sollen, bedeutet die komplizierte Geometrie des Stellarators eine zusätzliche Schwierigkeit.

Zusammenfassung

Das stationäre Magnetfeld macht den Stellarator zu einer vielversprechenden Alternative zum Tokamak. Der fehlende Plasmastrom verringert zudem den Energiebedarf, der für die Aufrechterhaltung des Plasmas notwendig ist. Um die grundlegenden Einschlusseigenschaften zu erfüllen, bedarf es eines optimierten Magnetfeldes und nicht-planarer Spulen, um dieses Feld zu generieren. Der Stellarator Wendelstein 7-X ist der erste Stellarator, dessen Design konsequent von solchen Optimierungskriterien abgeleitet wurde. Sein Konzept beruht auf eine weitestgehenden Entkopplung zwischen Magnetfeld und Plasma. Das Ziel von Wendelstein 7-X ist, die grundsätzliche Kraftwerkstauglichkeit des Konzepts nachzuweisen. Viele der noch durchzuführenden technologischen Entwicklungen sind für Tokamak und Stellarator sehr ähnlich. Eine der Herausforderungen für den Tokamak ist die Entwicklung einer effizienten Methode, den Plasmastrom stationär bereit zu stellen. Für ein Stellaratorkraftwerk ist dagegen mit einem größeren Entwicklungsaufwand für Brutblanket und Divertor zu rechnen.

Prof. Dr. Robert Wolf
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik
EURATOM Assoziation
Teilinstitut Greifswald
Wendelsteinstrasse 1
D-17491 Greifswald

Deutsche Physikalische Gesellschaft  DPG

Arbeitskreis Energie



Energie

Perspektiven und Technologien

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung in Dresden 2011

Herausgegeben von Hardo Bruhns

Energie

Perspektiven und Technologien

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung in Dresden 2011

Arbeitskreis Energie in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Herausgegeben von Hardo Bruhns

Bad Honnef, April 2012

Frühjahrstagung des Arbeitskreises Energie
in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft
Dresden, 13. bis 16. März 2011

Hauptvorträge

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	7
Übersicht über die Fachsitzungen.....	8
Abstracts aller Vorträge.....	9
Electrolytes in lithium-ion batteries: state of the art and future trend (presented by A. Balducci).....	27
Das Energiekonzept der Bundesregierung und andere Optionen für die Energiezukunft Deutschlands (vorgetragen von M. Popp).....	37
Vergleichende Bewertung von Stromerzeugungssystemen (vorgetragen von R. Friedrich).....	47
Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen - internationaler Stand und Perspektiven (vorgetragen von H. Geckeis).....	64
Nuclear Waste Transmutation: Status and Perspectives for Accelerator Driven Systems (ADS) in Europe (presented by A. C. Mueller).....	81
Der Stellarator - Ein alternatives Einschlusskonzept für ein Fusionskraftwerk (vorgetragen von R. Wolf).....	97
Production and conversion of liquid fuels and hydrogen from biomass and natural gas using microreactor technology (presented by P. Pfeifer).....	105
Physik der Windparkoptimierung (vorgetragen von S. Emeis).....	120

Geothermie für Grundlaststrom und Wärmeversorgung - internationale Nutzung, Potenzial, technologische Entwicklungen (vorgetragen von D. Bruhn).....	130
Einsatz großer Wärmepumpen im Industrie- und Gewerbebau (vorgetragen von R. Grimm)	140
Anforderungen an einen Wärmepumpentarif zur Überwindung diskriminierender Steuern und Abgaben beim thermodynamisch optimierten Heizen (vorgetragen von G. Luther).....	151
Clean Power from Deserts (presented by M. Düren).....	164
Hochkonzentrierende Photovoltaik: Stand der Entwicklungen und Perspektiven (vorgetragen von A. Bett)	182
Das Aufwindkraftwerk – Funktionsweise und aktueller Stand (vorgetragen von G. Weinrebe)	200

Direkter Link zum AKE - Archiv:

<http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/index.htm>

Direkter Link zum AKE - Archiv, Tagung 2011 -Dresden:

http://www.uni-saarland.de/fak7/fze/AKE_Archiv/DPG2011-AKE_Dresden/Links_DPG2011.htm

Der vorliegende Band fasst schriftliche Ausarbeitungen der Hauptvorträge der AKE Tagung des Jahres 2011 in Dresden zusammen. Leider ist es nicht gelungen, von allen Vortragenden Manuskripte zu erhalten. Die Präsentationsfolien der Hauptvorträge können auf der Webseite des Arbeitskreises über:

<http://www.dpg-physik.de/dpg/organisation/fachlich/ake.html>

(von dort gelangt man zum Archiv des AKE) eingesehen werden. Allen, die zu diesem Sammelband beigetragen haben, sei an dieser Stelle sehr herzlich gedankt.