

**Facharbeit  
des Schülers  
Martin Knorr  
im Fach Physik  
Klasse 10e**

**Thema:  
Kernfusion – die Energiequelle der Zukunft?**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b> .....	Seite 3
<b>2. Geschichte der Kernfusion</b> .....	Seite 3
<b>3. Grundlagen der Kernfusion</b> .....	Seite 4
<b>3.1. Fusionsreaktionen</b> .....	Seite 4
<b>3.2. Zündbedingungen</b> .....	Seite 5
<b>3.3. Der magnetische Einschluss</b> .....	Seite 6
<b>3.4. Stöße und Verunreinigungen</b> .....	Seite 7
<b>3.5. Plasmaheizungen</b> .....	Seite 7
<u>3.5.1. Stromheizung</u> .....	Seite 7
<u>3.5.2. Hochfrequenzheizung</u> .....	Seite 7
<u>3.5.3. Neutralteilchenheizung</u> .....	Seite 8
<b>4. Experimenttypen</b> .....	Seite 8
<b>4.1. Tokamak</b> .....	Seite 8
<b>4.2. Stellarator</b> .....	Seite 9
<b>5. Zukunftsaussichten</b> .....	Seite 9
<b>5.1. Fusionskraftwerk</b> .....	Seite 9
<b>5.2. Sicherheitsrisiken und Umweltverträglichkeit</b> .....	Seite 10
<b>5.3. ITER &amp; DEMO</b> .....	Seite 11
<b>6. Schlussbemerkungen</b> .....	Seite 12
<b>7. Anhang</b> .....	Seite 13
<b>7.1. Abbildungen</b> .....	Seite 13
<b>7.2. Tabellen</b> .....	Seite 18
<b>7.3. Quellenverzeichnis</b> .....	Seite 20
<u>7.3.1. Literaturverzeichnis</u> .....	Seite 20
<u>7.3.2. elektronische Quellen</u> .....	Seite 20
<b>8. Selbstständigkeitserklärung</b> .....	Seite 22

## 1. Einleitung

Als ich vor einigen Jahren das erste Mal etwas von der Kernfusion hörte, war ich sofort begeistert. Die Möglichkeit einer immens großen, für menschliche Maßstäbe nahezu unerschöpflichen Energiequelle faszinierte mich. Ich war überzeugt davon, dass es eines Tages keine Atomkraftwerke oder Kohlekraftwerke mehr geben würde und stattdessen alle nötige Energie zum größten Teil in Fusionskraftwerken erzeugt werden würde – unterstützt z. B. von Windkraftanlagen und Photovoltaikanlagen.

Ziel dieser Facharbeit soll es sein genau diese Frage nach der Zukunft der Energiequelle Kernfusion zu beantworten. Dazu werde ich die historische Entwicklung der Kernfusion betrachten, Grundlagen und Experimenttypen näher erläutern, auf physikalische und technologische Probleme bei der Verwirklichung eines Kernfusionskraftwerks eingehen und ein zukunftsträchtiges Projekt betrachten.

## 2. Geschichte der Kernfusion

Das erste Mal wurde eine Fusionsreaktion von Ernest Rutherford beobachtet, als er 1919 durch den Beschuss von Stickstoff mit Alphateilchen das Sauerstoffisotop  $^{17}\text{O}$  erzeugte. Bereits zehn Jahre später vermuteten Robert Atkinson und Fritz Houtermans als Energiequelle der Sonne und anderer Sterne die Verschmelzung leichter Atomkerne, was sich später als richtig herausstellte: Denn nach den Untersuchungen von Sir Arthur Eddington über die Vorgänge im Sonneninneren und von George Gamov zur Rolle des Tunneleffekts konnte Hans Bethe dies 1938 beweisen.

Rutherford führte 1934 die ersten Deuterium-Deuterium- und Deuterium-Tritium-Fusionsreaktionen mit Hilfe eines Teilchenbeschleunigers durch, welche in Fusionsexperimenten und zukünftigen Kraftwerken die wichtigste Rolle spielen, da sie bei verhältnismäßig geringer Temperatur die größte Energie freisetzen. (siehe Abb. 4 und 5) Zusammen mit Bethe lieferte Carl Friedrich Weizsäcker 1939 die quantitative Beschreibung der Fusionsprozesse im Inneren der Sonne. Dass die Kernfusion realisierbar ist, bewies die Entwicklung der Wasserstoffbombe 1950. Jedoch wurde dadurch die Kernfusion zunehmend abgelehnt und geriet sowohl gesellschaftlich als auch wissenschaftlich auf einen Irrweg. Viele Arbeiten zur zivilen Anwendung der Kernfusion wurden zunächst unter Verschluss gehalten und erst nach der zweiten Genfer Konferenz zur friedlichen Nutzung der Kernenergie im Jahre 1958 weiterentwickelt. Großes Interesse an der Kernfusion als Energiequelle zeigten dabei vor allem die beiden Supermächte USA

und UdSSR sowie einige europäischen Länder – besonders Großbritannien. Da sich die Experimente zum friedlichen Nutzen jedoch weitaus schwieriger und aufwendiger erwiesen, wurde mit intensiver Grundlagenforschung und mit sehr umfangreichen Langzeitprogrammen begonnen. Die meisten kraftwerksorientierten Forschungen befassen sich mit dem sogenannten magnetischen Einschluss. Dabei wird ein heißes Plasma durch ein starkes, torusförmiges (zylindrisch-gekrümmtes) Magnetfeld in einem Vakuumgefäß eingeschlossen, um es von den Wänden fernzuhalten. Allerdings wurde ebenso in den USA und Frankreich versucht, die sogenannte Trägheitsfusion zu verwirklichen. Hierbei wird eine kleine Kapsel des Fusionsbrennstoffes, die auch Pellet genannt wird, direkt oder auch indirekt durch Laserbeschuss komprimiert und erhitzt. Die Verschmelzungsreaktion soll durch die Trägheit des Brennstoffes zünden, bevor die Kapsel explodiert. Da jedoch viele Experten der Ansicht sind, dass eine technische Verwirklichung in Form eines Kraftwerks auf Basis der Trägheitsfusion technologisch schwieriger ist und auch länger dauern würde als auf Basis des magnetischen Einschlusses, wird diese Art des Einschlusses wohl Grundlage des ersten Fusionskraftwerkes werden.

### **3. Grundlagen der Kernfusion**

#### **3.1. Fusionsreaktionen**

Die Quelle der Fusionsenergie ist einer der elementaren Kräfte in der Natur. Die Rede ist von der Kraft, die alles zusammen hält – der Atombindung. Von Atomart zu Atomart unterscheidet sich die Stärke dieser Bindung. Je fester die Kernbausteine miteinander verbunden sind, desto mehr Energie wird benötigt, um den Kern zu spalten. Allerdings wird auf der anderen Seite auch umso mehr Energie frei, wenn der Kern aus ihnen erzeugt wird. Deshalb lässt sich aus der Verschmelzung zweier leichter Kerne wie Wasserstoff und seiner Isotope Deuterium und Tritium Energie gewinnen.

Da Atomkerne positiv geladen sind, stoßen sie sich gegenseitig ab. Aber nur wenn sie sich sehr nahe kommen, können sie miteinander verschmelzen. Erst dann überwiegen die anziehenden Kernkräfte, welche nur in unmittelbarer Nähe der Kerne wirken, die abstoßenden elektrischen Kräfte. Zur Lösung dieses Problems müssen die zwei Kerne mit großer Geschwindigkeit aufeinander zufliegen. Diese hohen Geschwindigkeiten erhalten die Teilchen bei hohen Temperaturen, durch die die Atome eines Gases ionisiert – in Elektronen und Kerne (Ionen) zerlegt – werden. Weil ionisierte Gase in ihren Eigenschaften von den normalen Gasen abweichen, werden sie in einen anderen

Aggregatzustand – nämlich das Plasma – eingeordnet. Da ein Plasma elektrisch leitfähig ist, lässt sich seine Bewegung durch elektrische und magnetische Felder beeinflussen, was man sich in den Fusionsanlagen mit magnetischem Einschluss zunutze macht. (siehe Abschnitt 3.3.) Das Plasma wird quasi in einem „Magnetfeldkäfig“ eingeschlossen und so von den Wänden abgehalten, die ansonsten das Plasma abkühlen und auch den hohen Temperaturen nicht standhalten würden. Wie bereits erwähnt, liefert die Reaktion zwischen Deuterium und Tritium die größte Energieausbeute bei der geringsten Plasmatemperatur. Je ein Deuterium- und Tritiumkern verschmelzen dabei zu einem Heliumkern. Außerdem wird ein Neutron frei, das achtzig Prozent der freiwerdenden Energie mit sich trägt. Trotz einiger Nachteile – Tritium ist radioaktiv und die bei der Fusion entstehenden schnellen Neutronen aktivieren die umgebenden Reaktorteile – wird dieses Verfahren aufgrund der vergleichsweise einfachen Verwirklichung wohl in Zukunft verwendet werden. Begünstigt würde dies durch die große Menge Deuterium, das in den Weltmeeren vorhanden ist. Ebenfalls reichlich vorhanden ist das Element Lithium, aus dem im Kraftwerk selbst durch die beim Fusionsprozess freigesetzten Neutronen Tritium erbrütet werden kann. Jedoch wird bei den gegenwärtigen Experimenten meist auf Tritium verzichtet. Stattdessen kommt Deuterium oder einfacher Wasserstoff zum Einsatz. Der frühe Einsatz von Tritium würde die Experimente unnötig erschweren. Nur das europäische Experiment JET (Joint European Torus) und der amerikanische TFTR (Tokamak Fusion Test Reaktor) haben bisher Tritium eingesetzt.

### **3.2. Zündbedingungen**

Das Plasma ist „gezündet“, wenn gerade so viele Fusionsprozesse ablaufen, dass die Energie der erzeugten Heliumkerne groß genug ist, um die Temperatur des Plasmas beizubehalten. Die Heizung von außen kann dann abgeschaltet werden, denn das Plasma brennt von alleine weiter. Drei Eigenschaften des Plasmas sind dafür von Bedeutung: die Temperatur, die Plasmadichte und die Energieeinschlusszeit, welche ein Maß für die Güte der Wärmeisolation des Plasmas ist. Für eine erfolgreiche Zündung muss das Produkt aus diesen Faktoren eine gewisse Mindestgröße haben. Zündbedingungen für ein Deuterium-Tritium-Plasma sind eine Temperatur von 100-200 Millionen Kelvin, etwa  $10^{14}$  Teilchen je Kubikzentimeter und einer Energieeinschlusszeit von 1-2 Sekunden. Aufgrund der äußerst niedrigen Dichte besitzt ein gezündetes Plasma trotz der hohen Temperatur eine kaum größere Leistungsdichte (Leistung je Fläche) als eine normale Glühbirne.

Die Fusionsforschung ist mittlerweile nahe an die Zündung herangerückt. (siehe Abb. 6) Das japanische JT-60 und das europäische Experiment JET lieferte weltweit die besten

Werte – sie sind nur noch um den Faktor sechs (Dichte x Plasmatemperatur x Energieeinschlusszeit) vom Erreichen der Zündbedingungen entfernt. Die dafür notwendige Temperatur wird mittels Heizung von außen erzeugt (siehe Abschnitt 3.5.) und die Plasmadichte kann durch Nachfüllen von Gas erhöht werden. Am schwierigsten zu erreichen ist die nötige Energieeinschlusszeit. Denn führt man die Energie zu schnell aus dem Zentrum des Plasmas ab, kann die hohe Temperatur nicht weiter erhalten werden: Folglich erlischt der Brennvorgang.

### **3.3. Der magnetische Einschluss**

Wie bereits erwähnt, lässt sich das ionisierte Plasma durch starke Magnetfelder einschließen und so von der Toruswand fernhalten. Dies wird möglich, da sich die Ionen und Elektronen aufgrund ihrer Ladung bei Bewegung senkrecht zur Magnetfeldrichtung auf Kreis- bzw. Schraubenbahnen um die Magnetfeldlinien herum bewegen müssen und sie sich in Längsrichtung der Feldlinien ungehindert fortbewegen können.

Eine mögliche Form des Einschlusses wäre eine zylindrische. Jedoch würden die Teilchen an den offenen Enden entweichen können. Um dem entgegen zu wirken, benutzt man ringförmige (toroidale) Felder zum Einschluss des Plasmas. Aber auch diese Konfiguration bringt noch nicht den gewünschten Erfolg mit sich, denn aus geometrischen Gründen sinkt die Feldstärke nach außen hin ab, was zur Folge hat, dass die Teilchen trotzdem entweichen können. Es gibt zwei Möglichkeiten die Stabilität wieder herzustellen: Einerseits durch elektrische Ströme innerhalb und andererseits durch elektrische Ströme außerhalb des Plasmaschlauches.

Die elektrischen Ströme innerhalb des Plasmas werden erzeugt, indem das Plasma selbst zu einer Sekundärspule eines Transformators gemacht wird. Durch einen Stromimpuls in der Primärspule des Transformators entsteht ein sich änderndes Magnetfeld, wodurch in der Sekundärspule eine Spannung induziert wird. (siehe Abb. 1)

Bei der zweiten Methode befinden sich außerhalb des Plasmaschlauches neben den Spulen für das toroidale Magnetfeld auch noch spiralförmig angeordnete Spulen, die den Torus umlaufen. Diese beiden Typen werden in Abschnitt 4 näher erläutert.

Das magnetische Feld muss zusätzlich aber noch den großen Druck – bestimmt durch Plasmadichte und Plasmatemperatur – aufnehmen können, den ein heißes Plasma erzeugt. Unter Zündbedingungen liegt der etwa bei 5 bis 10 bar – bis zu 5-mal so viel wie in einem Autoreifen. Durch die Bindung der Teilchen an die Feldlinien übt das Magnetfeld einen Gegendruck aus, wodurch das Plasma eingeschlossen wird.

### **3.4. Stöße und Verunreinigungen**

Eine wichtige Voraussetzung für die Fusion sind Zusammenstöße von Ionen, denn nur dann kann eine Verschmelzung stattfinden. Jedoch führen die meisten Stöße nicht zur Fusion, sondern zur Änderung von Geschwindigkeit und Richtung der beiden am Zusammenstoß beteiligten Ionen, wodurch die Teilchen für kurze Zeit nicht mehr an ihre Feldlinien gebunden sind. Durch jeden Stoß werden die Ionen auf eine angrenzende Feldlinie befördert. Nach genügend Stößen können die Teilchen so nach außen oder sogar auf die Gefäßwand gelangen. Umgekehrt können so aber auch Wandatome in das Plasma gelangen. Allerdings sind schwere Atome wie z. B. Eisen, Nickel oder Sauerstoff selbst bei den hohen Temperaturen wie sie in einem Fusionsgefäß herrschen nicht völlig ionisiert. Je höher die Ladungszahlen der Verunreinigungen (z. B. Wandatome), desto mehr Elektronen befinden sich noch an den Atomrümpfen. Aber je mehr Elektronen an den Atomen, desto mehr Energie entziehen sie dem Plasma, die sie als Ultraviolett- oder Röntgenlicht wieder abgeben. Dadurch wird das Plasma abgekühlt und verdünnt, wodurch die Fusionsausbeute sinkt. Ab einer bestimmten Konzentration von Verunreinigungen ist das Plasma nicht mehr in der Lage zu zünden.

### **3.5. Plasmaheizungen**

#### 3.5.1. Stromheizung

Da das Plasma leitfähig ist und aufgrund der Stöße seiner Teilchen einen Widerstand besitzt, kann ein elektrischer Strom durch das Plasma geschickt werden, welcher durch den Widerstand Wärme erzeugt. Mit zunehmender Temperatur nehmen jedoch auch die Stöße der Teilchen ab, weshalb die Stromheizung nur in der Anfangsphase zur Erwärmung des Plasmas genutzt werden kann. Dieser Strom kann wie in Abschnitt 3.3. Absatz 3 beschrieben erzeugt werden. Natürlich kann der Plasmastrom seine Richtung nicht umkehren, weshalb nur eine Halbwelle der induzierten Spannung ausgenutzt werden kann. Der elektrische Strom fließt daher nur pulsweise.

#### 3.5.2. Hochfrequenzheizung

Durch das Einstrahlen elektromagnetischer Wellen der richtigen Frequenz können die Eigenschwingungen ausführenden Ionen und Elektronen eines Plasmas resonant angeregt

werden. Dabei nehmen sie Energie aus dem Feld der Welle auf, welche sie durch Stöße an andere Teilchen weitergeben. Auf diese Weise wird das Plasma weiter erhitzt.

### 3.5.3. Neutralteilchenheizung

Über einen sogenannten Neutralteilcheninjektor werden Teilchen mit großer Geschwindigkeit in das Plasma hineingeschossen. Sie übertragen ihre Energie durch Stöße an die Plasmateilchen und heizen sie so auf.

## **4. Experimenttypen**

### **4.1. Tokamak**

Die zwei aussichtsreichsten Experimenttypen für die spätere Verwirklichung als Fusionskraftwerk sind der Tokamak und der Stellarator. Tokamak steht für das russische „toroidalnaya kamera s magnitnymi katushkami“, was frei übersetzt „toroidale Kammer mit Magnetfeld“ bedeutet.

Der Tokamak besitzt zwei sich überlagernde Magnetfelder: Ein toroidales Feld, welches von den äußeren Spulen erzeugt wird, und ein zweites, das durch den im Plasma fließenden Strom gebildet wird. In diesem kombinierten Feld laufen die Feldlinien schraubenförmig um die zentrale Magnetfeldlinie. So wird die nötige Verdrillung zum Einschluss des Plasmas und der Aufbau von magnetischen Flächen bewirkt. Außer diesen beiden Feldern wird noch ein drittes, vertikales Feld, benötigt, um die Lage des Plasmaschlauchs im Plasmagefäß zu fixieren. (siehe Abb. 2, 8 und 10) Der elektrische Strom im Plasma hat noch eine andere Wirkung: Er heizt das Plasma von Beginn an auf. (siehe Abschnitt 3.5.1.) Da zum Betrieb eines Tokamaks dieser Strom im Plasma unabdingbar ist und der konstante Strom nur eine endliche Zeit lang induziert werden kann, ist für den Tokamak das Arbeiten ebenfalls nur in Pulsen möglich. Ein Kraftwerk kann jedoch aus technischen Gründen nicht gepulst betrieben werden. Deshalb wird nach Möglichkeiten gesucht, den Strom auf andere Weise im Plasma zu erzeugen. Dies wäre z. B. auch durch Hochfrequenzwellen möglich, die international weiter untersucht werden und einen Dauerbetrieb auch bei Tokamaks möglich machen würden. Zu Beginn der Fusionsforschung hatten die Tokamaks aufgrund ihrer „eingebauten Heizung“ einen großen Entwicklungsvorsprung, weshalb sich die meisten Experimente weltweit diesem Prinzip widmeten. So sind z. B. TEXTOR-94, ASDEX Upgrade (beide aus Deutschland), JET (Großbritannien/European Fusion

Development Agreement) oder JT-60 (Japan) alles Tokamaks. Auch der „International Thermonuclear Experimental Reactor“ (ITER), über dessen Standort zurzeit beraten wird, wird eine Anlage vom Typ Tokamak sein.

## **4.2. Stellarator**

Stellaratoren erzeugen ihren magnetischen Käfig durch eine Vielzahl von nichtebenen Einzelspulen, die durch ihre Form die Drehung der Feldlinien um die Seele bewirken. (siehe Abb. 3) Ein Plasmastrom oder ein Vertikalfeld sind nicht nötig. Deswegen ist es möglich, den Stellarator in Dauerbetrieb zu nehmen.

Der Vorsprung des Tokamaks schwindet also dahin, denn aufgrund der Fortschritte in der Computertechnologie kann nun die Spulenanordnung und damit die Magnetfeldstruktur optimal berechnet werden. Dank intensiver Forschung liefern die Stellaratoren dieses neuen Typs jetzt sehr ermutigende Ergebnisse. Es ist aber noch weitere Forschungsarbeit an größeren Stellaratoren nötig, um deren Tauglichkeit und praktische Brauchbarkeit für zukünftige Fusionsreaktoren zu demonstrieren. Genau dieses Ziel verfolgt das IPP (Institut für Plasmaphysik) mit ihrer WENDELSTEIN-Serie. 1988 ging die erste Anlage der neuen Stellarator-Generation in Betrieb: WENDELSTEIN 7-AS. Dieser „Advanced Stellarator“ sollte die Voraussetzungen für den derzeit in Greifswald im Bau befindlichen WENDELSTEIN 7-X schaffen. WENDELSTEIN 7-X soll die prinzipielle Kraftwerkseignung des Advanced Stellarators beweisen. Der erste Plasmabetrieb wird für 2010 erwartet.

## **5. Zukunftsaussichten**

### **5.1. Fusionskraftwerk**

In den Köpfen der Wissenschaftler sieht ein zukünftiges Fusionskraftwerk wie folgt aus: Kernstück der Anlage ist eine ringförmige Brennkammer, in der ein Magnetfeld das Deuterium-Tritium-Plasma einschließt. Bis zur Zündung wird durch die Startheizung eine Leistung von ca. 50-100 MW zugeführt. Nun brennt das Plasma selbstständig weiter; die Startheizung kann abgeschaltet werden. Um ein Erlöschen des Fusionsfeuers zu verhindern, werden über sogenannte Divertoren die entstandenen Heliumkerne und Verunreinigungen entfernt. Die entstandenen Neutronen können aufgrund ihrer elektrischen Neutralität den Magnetfeldkäfig ungehindert verlassen. Sie treffen auf den das

Plasmagefäß umgebenden Lithiummantel (Blanket) und wandeln dort Lithium in Tritium und Helium um. Das Tritium wird „aufgesammelt“ und über Zwischenspeicher dem Plasma zusammen mit Deuterium hinzugegeben. Ein Kraftwerk mit einer Leistung von einem Gigawatt verbraucht etwa 20 Gramm Tritium je Stunde. Des Weiteren wird im Blanket die Energie der Neutronen aufgenommen, indem die Teilchen abgebremst werden und die Umgebung erwärmen. Diese Wärmeenergie wird über Kühlmittel, Wärmetauscher abgeführt und mittel Dampferzeuger und Turbogenerator in elektrische Energie umgewandelt. Durch eine abschirmende Hülle über dem Blanket werden Strahlung und Neutronen von der Außenwelt abgehalten. Zusätzlich ist das gesamte Kraftwerk von einer weiteren Sicherheitshülle umgeben. (siehe Abb. 7) Einen Überblick über die technischen Daten eines Tokamak-Kraftwerks (siehe Tabelle 1) und eines Stellarator-Kraftwerks (siehe Tabelle 2) schaffen die beiden Tabellen.

## **5.2. Sicherheitsrisiken und Umweltverträglichkeit**

Ein Vorteil der Kernfusion ist es, dass keine langlebigen radioaktiven Abfallprodukte wie in einem Kernspaltungskraftwerk entstehen. Jedoch können die freiwerdenden, hochenergetischen Neutronen das Strukturmaterial des Reaktors aktivieren (radioaktive Isotope erzeugen). Sowohl Tritium als auch diese aktivierten Bauteile haben ein relativ geringes biologisches Gefährdungspotenzial. Um dieses Problem dennoch einzudämmen, kann man neue Materialien entwickeln oder Werkstoffe verwenden, die niedrig aktivierbar sind. In ferner Zukunft könnte das Aktivierungsproblem auch hinsichtlich anderer Reaktionsstoffe abnehmen, bei denen weniger Neutronen entstehen. Bei der Reaktion von Deuterium und Helium-3 z. B. könnte die induzierte Radioaktivität bis zu fünfzigmal niedriger sein.

Aufgrund der geringen Menge des notwendigen Brennstoffes (in jedem Moment nur wenige Gramm) kann der Fusionsprozess nicht außer Kontrolle geraten. Im Gegensatz zum Kernspaltungsreaktor, wo eine Kettenreaktion stattfindet, müssen im Fusionskraftwerk bestimmte optimierte Bedingungen geschaffen werden, damit der Fusionsprozess überhaupt abläuft. Bereits eine kleine Abweichung von diesen Bedingungen würde den Fusionsprozess sofort stoppen. Unfälle ähnlich wie in Tschernobyl sind daher vollkommen ausgeschlossen.

Um einen Westeuropäer ein Leben lang mit Energie zu versorgen werden lediglich 10 Gramm Deuterium und 15 Gramm Tritium benötigt – also praktisch nichts. Die jährlich für ein Fusionskraftwerk erforderliche Menge der beiden Reaktionsstoffe ließe sich in einem Lastwagen transportieren, wobei keine radioaktiven Stoffe transportiert würden. Auch das

Endprodukt – Helium – ist weder radioaktiv noch sonst irgendwie gefährlich. Ebenfalls gibt es keine schädlichen Abgase, die zum Treibhauseffekt, zu saurem Regen oder zum Abbau der Ozonschicht führen könnten.

### **5.3. ITER & DEMO**

ITER – lateinisch für „der Weg“ – wird der nächste große (Tokamak-)Experimentalreaktor sein und soll zum ersten Mal ein für längere Zeit brennendes Fusionsplasma und die technologische Machbarkeit der Fusion zur Energieerzeugung demonstrieren. (siehe Abb. 9) Außerdem will man an ITER die für ein Kraftwerk notwendigen Komponenten wie z. B. Blanket und supraleitende Magnetspulen testen. Wissenschaftler aus der ganzen Welt (Europa, Japan, Korea, und Russland; seit kurzem auch China und die USA) beteiligen sich an diesem „internationalen thermonuklearen Experimentalreaktor“, der nach dem Abschlussbericht von 2001 etwa 4 Milliarden Euro kosten wird. (Charakteristische Daten von ITER siehe Tabelle 3)

Entsprechend seiner lateinischen Bedeutung ist ITER der Weg zu einem Demonstrationskraftwerk, das zum ersten Mal wirtschaftlich arbeiten und Strom erzeugen soll (DEMO). Zurzeit diskutiert man noch über den Standort von ITER: Südfrankreich oder Japan. Eine Entscheidung sollte Mitte Februar fallen – nachdem die Partner im Dezember zu keiner Einigung kamen – jedoch lagen mir bis zum Abgabedatum keine Informationen über eine Standortentscheidung vor. Sobald eine Baugenehmigung – ob für Frankreich oder Japan – vorliegt, wird es etwa ein Jahrzehnt in Anspruch nehmen, ITER zu bauen. Dann sollen Experimente und Tests durchgeführt werden, bis ITER nach 20 Jahren demontiert wird. Aus den Erkenntnissen, die aus dem Gemeinschaftsprojekt gezogen werden, soll das erste kommerziell Strom aus Fusionsenergie erzeugende Kraftwerk DEMO gebaut werden. Man rechnet mit dem Betriebsbeginn von DEMO etwa im Jahre 2040.

## **6. Schlussbemerkungen**

Ist die Kernfusion nun *die* Energiequelle der Zukunft? Nach Abschluss dieser Arbeit bin ich der Meinung, dass die Kernfusion langfristig eine gute Chance auf den Titel der Energiequelle der Zukunft hat. Kurzfristig wird sich jedoch – leider – nicht viel an der Energiezusammensetzung ändern. Solange es genügend Kohle gibt, werden weiterhin

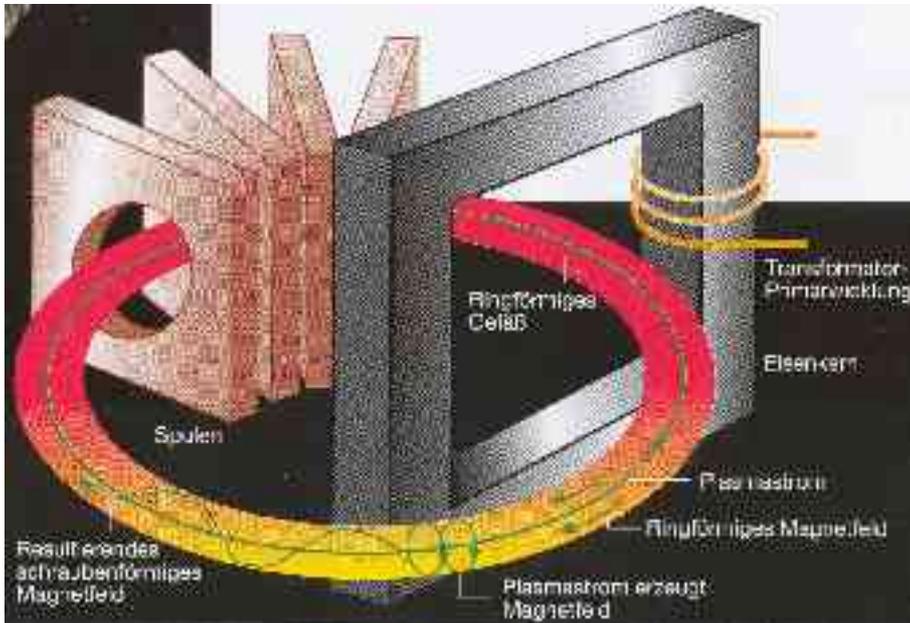
Kohlekraftwerke betrieben werden. Solange Kernspaltungsreaktoren von der Bevölkerung toleriert werden und es keine andere Möglichkeit gibt „sauber“ so viel Energie zu erzeugen, wie die Kernkraftwerke es tun, wird es auch sie weiterhin geben. Mittelfristig wird aber vor allem die Menge des durch regenerative Energien wie z. B. Wasserkraft, Windkraft oder Solarenergie erzeugten Stroms ansteigen.

Dass die Menschheit langfristig lernen muss auf Energie aus Rohstoffen wie Öl oder Kohle zu verzichten, scheint klar – besonders wenn man den Jahresverbrauch und die Abfälle der einzelnen Kraftwerkstypen vergleicht (siehe Tabelle 4). Als einzige Alternativen bleiben weiterhin die klassische Kernenergie, erneuerbare Energien und ab ca. 2055 die Kernfusion. Denn mit der Besinnung auf stärkeren Klimaschutz, was mit Sicherheit in nächster Zeit geschehen wird, wenn sogar die USA nach einer Studie des US-Verteidigungsministeriums – nach der eine größere Gefahr von der Klimaveränderung als vom internationalen Terrorismus ausgeht – über Klimaschutz sprechen, fallen Kohle- bzw. Ölkraftwerke so gut wie weg. Bleiben noch Kernspaltung und Wasser-, Wind- und Sonnenenergie. Sollten andere Länder dem Beispiel aus Deutschland zur Abschaffung der Kernkraftwerke folgen, würden auch diese in Zukunft einen geringer werdenden Anteil zur Energieerzeugung beisteuern. Allein dieser Anteil müsste schon ausgeglichen werden. Zusätzlich wird der Energiebedarf in der Zukunft aufgrund der wachsenden Bevölkerungszahl und der verstärkten industriellen Entwicklung z. B. in China noch steigen. Bis die Kernfusion einsetzbar ist, werden sowieso viele Kraftwerke aufgrund ihres hohen Alters zurückgebaut werden müssen. Das sind gute Voraussetzungen für die Kernfusion. Sollte die Effektivität der erneuerbaren Energien nicht stark erhöht werden, wäre die Kernfusion in Zukunft die einzige Energiequelle, die relativ sicher viel Energie erzeugen kann – wenn sie trotz der teilweisen Radioaktivität von der Bevölkerung akzeptiert wird.

## 7. Anhang

### 7.1. Abbildungen

**Abb. 1**

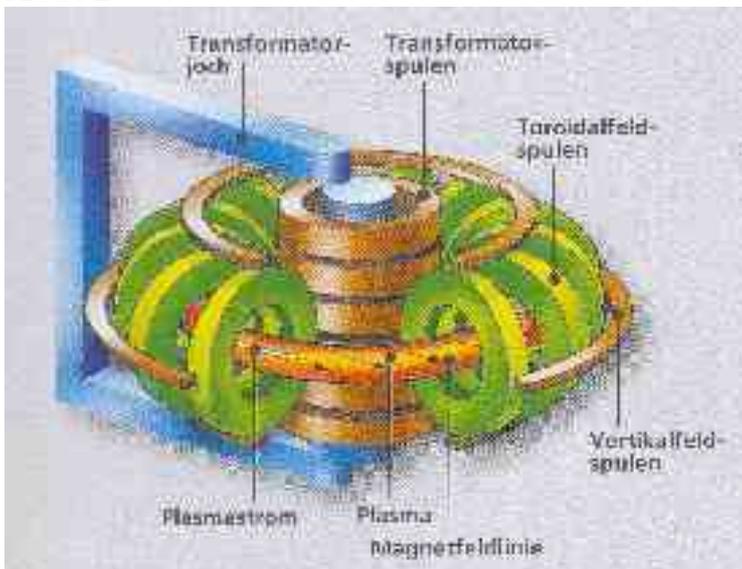


**Plasmaschlauch eines Tokamaks mit Magnetfeldlinien.**

(Quelle: J. Ongena u.a. (Autorenkollektiv des Trilateral Euregio Cluster): Kernfusion: Eine Herausforderung

für die Menschheit. Brüssel / Jülich: Juli 2001, Seite 5)

**Abb. 2**



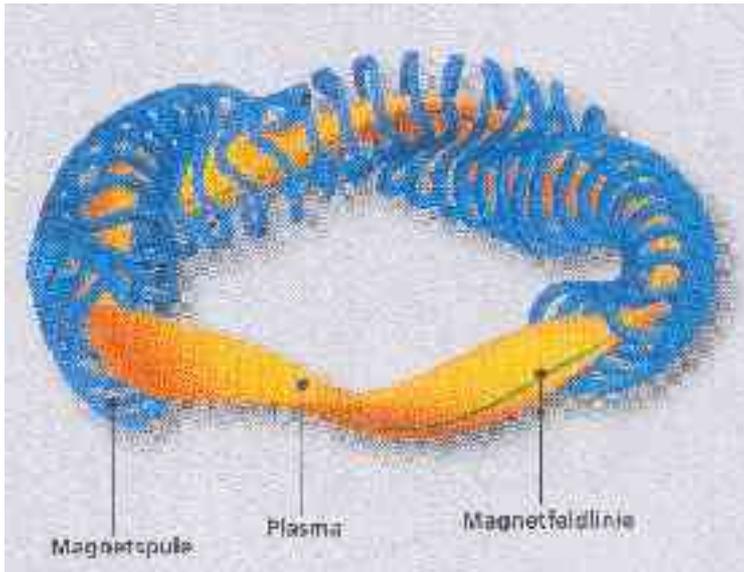
**TOKAMAK – schematische Darstellung.**

**Beim Tokamak wird das Plasma durch das Magnetfeld von Toroidal-, Vertikalspulen eingegrenzt. Zusätzlich wird das magnetische Feld eines Plasmastromes zum Einschluss benötigt.**

(Quelle: Dipl.-Geol. Thomas Vogt, Hrsg. Forschungszentrum Jülich GmbH: Forschen in Jülich. Nr. 2/99, Dezember 1999. ISSN 1433-7371. Auflage: 15.000. Seite 7)

**Abb. 3**

**STELLARATOR – schematische Darstellung.**



**Bei einem Stellarator erzeugen dutzende unterschiedlich geformte Spulen das Magnetfeld.**

(Quelle: Dipl.-Geol. Thomas Vogt, Hrsg. Forschungszentrum Jülich GmbH: Forschen in Jülich. Nr. 2/99, Dezember 1999. ISSN 1433-7371. Auflage: 15.000.

Seite 7)

**Abb. 4**

Fusionsreaktionen		
$D + T$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + n + 17,58 \text{ MeV}$
$D + D$	$\rightarrow$	${}^3\text{He} + n + 3,27 \text{ MeV}$
$D + D$	$\rightarrow$	$T + p + 4,03 \text{ MeV}$
$D + {}^3\text{He}$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + p + 18,35 \text{ MeV}$
$p + {}^{11}\text{B}$	$\rightarrow$	$3 {}^4\text{He} + 8,7 \text{ MeV}$
Brutreaktionen in Lithium		
${}^7\text{Li} + n$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + T + n - 2,47 \text{ MeV}$
${}^6\text{Li} + n$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + T + 4,78 \text{ MeV}$

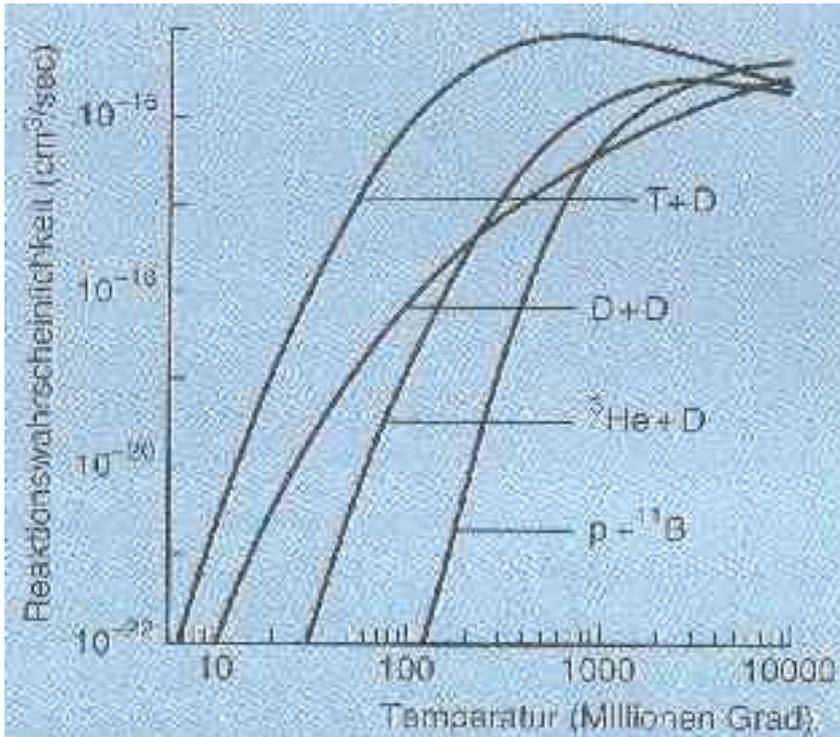
**Unterschiedliche Fusionsreaktionen und Brutreaktionen zur Gewinnung von Tritium aus Lithium.**

(Quelle: Isabella Milch, Hrsg. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP): Kernfusion – Berichte aus

der Forschung. Folge 1, ISSN 0172-8482, Oktober 1995. Seite 9)

**Abb. 5**

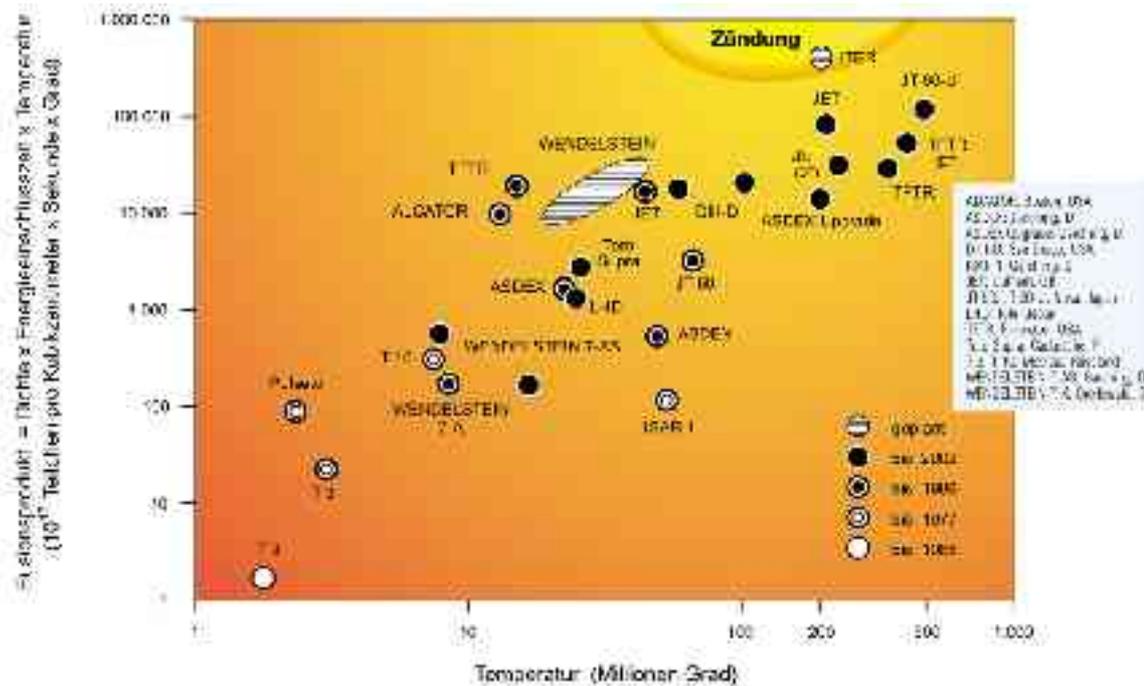
**Wahrscheinlichkeiten unterschiedlicher Fusionsreaktionen. Die Deuterium-Tritium-Fusion besitzt fast über den gesamten Bereich eine größere Wahrscheinlichkeit als**



alle anderen  
Reaktionen.

(Quelle: Isabella Milch,  
Hrsg. Max-Planck-  
Institut für  
Plasmaphysik (IPP):  
Kernfusion – Berichte  
aus der Forschung.  
Folge 1, ISSN 0172-  
8482, Oktober 1995.  
Seite 9)

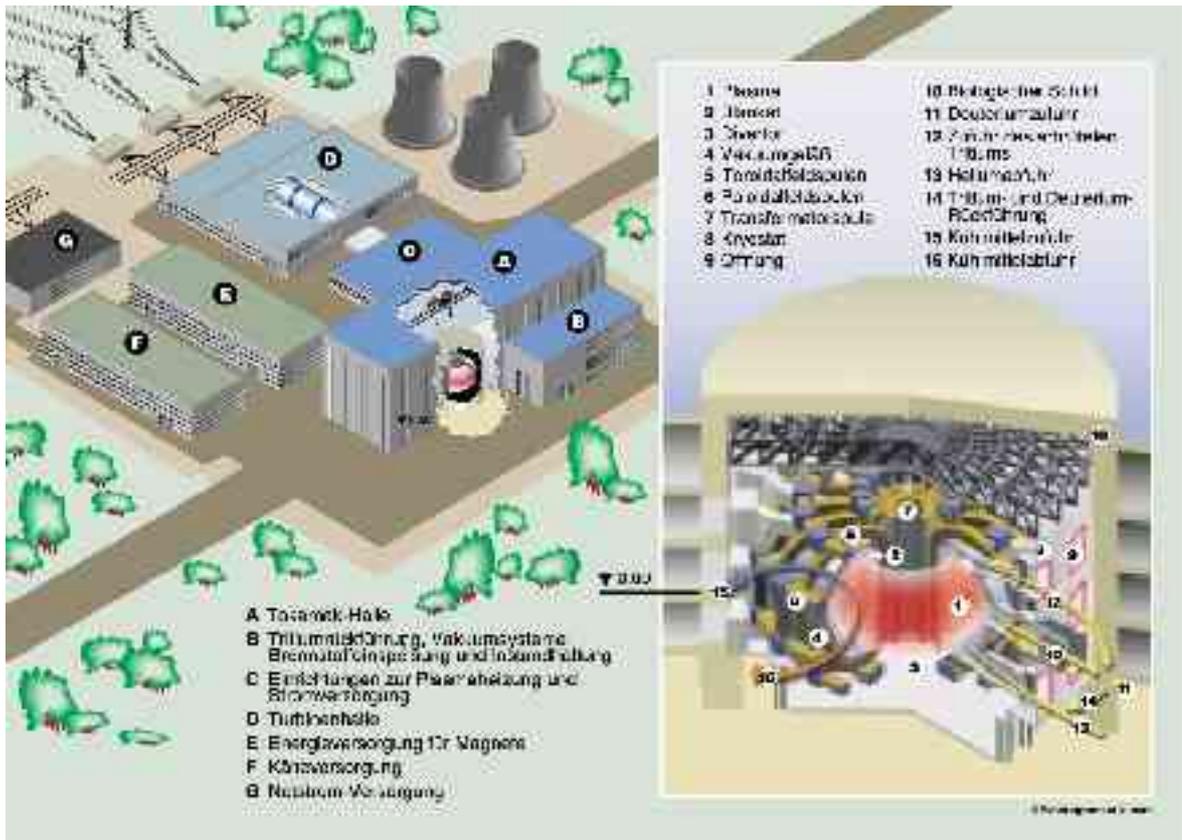
Abb. 6



**Übersicht über die Fusionsprodukte unterschiedlicher Experimente.**

(Quelle: Isabella Milch, Hrsg. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP): Kernfusion –  
Berichte aus der Forschung. Folge 2, ISSN 0172-8482, 2002. Seite 10)

Abb. 7



### Schematische Darstellung eines zukünftig möglichen Fusionskraftwerks.

(Quelle: Isabella Milch, Hrsg. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP): Kernfusion – Berichte aus der Forschung. Folge 2, ISSN 0172-8482, 2002. Seite 29)

### Abb. 8



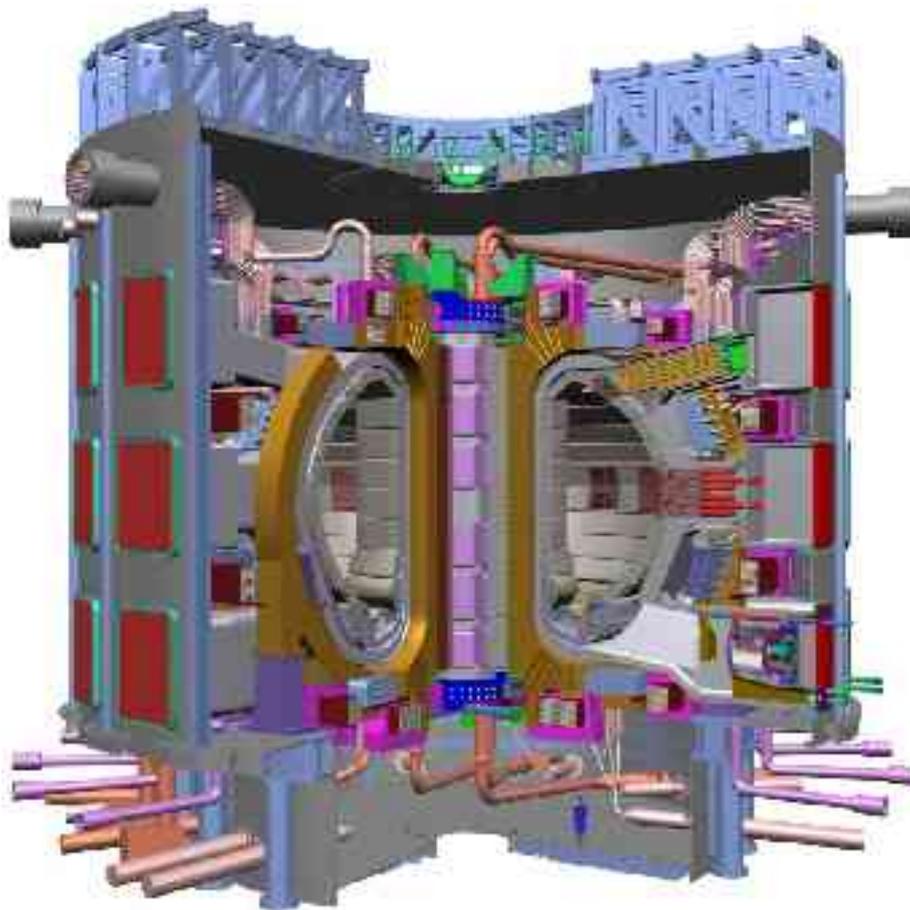
**Innenansicht des Tokamak TEXTOR-94 im Forschungszentrum Jülich durch ein Beobachtungsfenster.**

**Toroidalfeldspulen und Wandverkleidungen sind erkennbar.**

(Quelle: Basler & Hofmann,

<http://www.bhz.ch/fragen/2001/12/innenansicht.jpg>. Zugriff: 24. Feb. 2004)

### Abb. 9



**Entwurf von  
ITER. Von  
innen nach  
außen:  
Transformator-  
spule (rosa),  
Blanket (grau),  
Plasmagefäß  
(grau) und  
Magnete  
(braun).**

(Quelle: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH,  
[http://hbksun17.fzk.de:8080/PKF/images/feat\\_gr.jpg](http://hbksun17.fzk.de:8080/PKF/images/feat_gr.jpg). Zugriff: 24. Feb. 2004)

**Abb. 10**



**Brennendes Plasma im TEXTOR-94 im  
Forschungszentrum Jülich.**

(Quelle: Basler & Hofmann,

<http://www.bhz.ch/fragen/2001/12/BrennendesPlasma.jpg>. Zugriff: 24. Feb. 2004)

## 7.2. Tabellen

Tabelle 1: Charakteristische Daten eines Tokamak-Kraftwerks

Großer Plasmaradius:	9 Meter
Plasmahöhe:	10 Meter
Plasmabreite:	6 Meter
Plasmavolumen:	760 Kubikmeter
Magnetfeld:	7 Tesla
Maximaler Plasmastrom:	28 Megaampere
Startheizung und Strombetrieb:	234 Megawatt
Wandbelastung durch Neutronen:	1,8 Megawatt pro m <sup>2</sup>
Fusionsleistung:	3400 Megawatt
Brenndauer:	Dauerbetrieb

(Quelle: Isabella Milch, Hrsg. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP): Kernfusion – Berichte aus der Forschung. Folge 2, ISSN 0172-8482, 2002. Seite 29)

Tabelle 2: Charakteristische Daten eines Stellarator-Kraftwerks

Durchmesser der Anlage (über alles):	50 Meter
Höhe (über alles):	15 Meter
Großer Plasmaradius:	18 Meter
Mittlerer kleiner Plasmaradius:	2,1 Meter
Plasmavolumen:	1600 Kubikmeter
Plasmagewicht:	0,2 – 1,5 Gramm
Anzahl der modularen Spulen:	40
Plasmastrom:	0
Magnetfeld (Achse):	5 Tesla
Magnetfeld (Spule):	10 Tesla
Wandbelastung durch Neutronen:	≤ 1 Megawatt pro m <sup>2</sup>
Brenndauer:	Dauerbetrieb
Startheizung:	50 – 80 Megawatt
Fusionsleistung:	3000 Megawatt

(Quelle: Isabella Milch, Hrsg. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP): Kernfusion – Berichte aus der Forschung. Folge 2, ISSN 0172-8482, 2002. Seite 66)

Tabelle 3: Charakteristische Daten des ITER-Experiments (Nach Abschlussbericht vom Juli 2001)

Gesamtradius (über alles):	15 Meter
Höhe (über alles):	30 Meter
Gewicht:	15.000 Tonnen
Plasmaradius:	6,2 Meter
Plasmahöhe:	7,4 Meter
Plasmabreite:	4,0 Meter
Plasmavolumen:	837 Kubikmeter
Magnetfeld:	5,3 Tesla
Maximaler Plasmastrom:	15 Megaampere
Heizleistung und Strombetrieb:	73 Megawatt
Wandbelastung durch Neutronen:	0,57 Megawatt pro m <sup>2</sup>
Fusionsleistung:	500 Megawatt
Brenndauer:	≥ 300 Sekunden

(Quelle: Isabella Milch, Hrsg. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP): Kernfusion – Berichte aus der Forschung. Folge 2, ISSN 0172-8482, 2002. Seite 53)

Tabelle 4: Brennstoffverbrauch und Abfall für 1000 MW

<u>Kraftwerkstyp</u>	<u>Jahresverbrauch</u>	<u>Abfall</u>
Steinkohle	2.700.000 Tonnen	10.000.000 Tonnen CO <sub>2</sub>
Öl	1.900.000 Tonnen	219.000 Tonnen SO <sub>2</sub> 29.000 Tonnen NO <sub>x</sub>
Spaltung	32 Tonnen UO <sub>2</sub> m. 3% <sup>235</sup> U	(Steinkohle und Öl zusammen) 32 Tonnen hochradioaktiver, nur teilweise verbrannter Brennstoff
Solarenergie (Photovoltaik)	Mitteleuropa: 100 km <sup>2</sup> Solarzellen Sahara: 50 km <sup>2</sup> Solarzellen	
Fusion	100 kg D und 150 kg T (aus 300 kg Lithium-6)	400 kg Helium

(Quelle: J. Ongena u.a. (Autorenkollektiv des Trilateral Euregio Cluster): Kernfusion: Eine Herausforderung für die Menschheit. Brüssel / Jülich: Juli 2001, Seite 6)

### 7.3. Quellenverzeichnis

#### 7.3.1. Literaturverzeichnis

Birkelbach, Helge u.a. (Autorenkollektiv der Welt der Wunder-Zeitschrift): „Welt der Wunder“, Zeitschrift, Stuttgart: delta productions GmbH, Oktober/November 1999.

Casci, Federico; Hrsg. European Fusion Development Agreement (EFDA): „Cleaner Energy for the future – the development of fusion power“. Garching, 2003.

Evers, Harry-H.; Hrsg. VDI Verein Deutscher Ingenieure: IQ-Journal, Quartal 3/02, Sonderausgabe: „Quo vadis Kernfusion? – Der lange Weg zum ersten kommerziellen Reaktor“.

Karamanolis, Stratis: "Heißer als die Sonne - Energie aus Kernfusion?". Neubiberg: Elektra, 1992.

Milch, Isabella; Hrsg. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP): „Kernfusion – Berichte aus der Forschung“. Folge 1, ISSN 0172-8482, Oktober 1995.

Milch, Isabella; Hrsg. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP): „Kernfusion – Berichte aus der Forschung“. Folge 2, ISSN 0172-8482, 2002.

Ongena, J. u.a. (Autorenkollektiv des Trilateral Euregio Cluster): „Kernfusion: Eine Herausforderung für die Menschheit“. Brüssel / Jülich: Juli 2001.

Rebhan, Eckhardt: „Heißer als das Sonnenfeuer – Plasmaphysik und Kernfusion“, Piper Verlag, München 1992.

Schorn, Ralph P.; Hrsg. Trilateral Euregio Cluster (TEC): „Fusion Research in the Euregio – Working for an inexhaustible energy resource“. Holland / Belgien / Deutschland 2000.

Vogt, Thomas, Dipl.-Geol.; Hrsg. Forschungszentrum Jülich GmbH: „Forschen in Jülich“. Nr. 2/99, Dezember 1999. ISSN 1433-7371. Auflage: 15.000.

#### 7.3.2. elektronische Quellen

[http://hbksun17.fzk.de:8080/PKF/d\\_index.html](http://hbksun17.fzk.de:8080/PKF/d_index.html); Zugriff: 24. Feb. 2004.

<http://marcus-haas.de/Wissenschaft/technologie/kernfusion.html>; Zugriff: 24. Feb. 2004.

<http://www.bhz.ch/fragen/2001/12>; Zugriff: 24. Feb. 2004.

<http://www.fz-juelich.de/ipp/iter>; Zugriff: 24. Februar 2004.

<http://www.fz-juelich.de/ipp/plasmaeinschluss>; Zugriff: 24. Feb. 2004.

<http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/forschung/iter/index.html>; Stand: 27.01.2004.

<http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/forschung/iter/projekt/index.html>; Stand 03.02.2004.

<http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/forschung/iter/stand/index.html>; Stand 03.02.2004.

<http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/forschung/w7x/stand/index.html>; Stand 04.12.2003.

<http://www.pro-physik.de/Phy/pdfs/ISSART13404DE.PDF>; Zugriff: 24. Feb. 2004.

[http://www.pts.schule.at/index.php?url=news&bereich=&suchtext=Kernfusion&news\\_id=1870](http://www.pts.schule.at/index.php?url=news&bereich=&suchtext=Kernfusion&news_id=1870); Zugriff: 24. Feb. 2004.

<http://www.schulen.regensburg.de/wvsg/science/fusion/heiz.htm>; Stand: 1997.

<http://www.schulen.regensburg.de/wvsg/science/fusion/magn.htm>; Stand: 1997.

<http://www.sfv.de/sob99208.htm>; Stand: 1999; Zugriff: 25. Feb. 2004.

<http://www.tab.fzk.de/de/projekt/zusammenfassung/ab75.htm>; Zugriff: 24. Feb. 2004.

<http://www.taz.de/pt/2004/02/23/a0182.nf/text.ges,1>; Zugriff: 24. Feb. 2004.

Ich erkläre, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Bad Doberan, den 26. Februar 2003

\_\_\_\_\_  
Unterschrift