

Nico Klingner

Kernfusion als Energiequelle der Zukunft

Schule: Wiprecht - Gymnasium - Groitzsch

Name: Nico Klingner

Datum: 02. April 2005

Kurs: Grundkurs Physik 11

Schuljahr: 2004 / 2005

Thema: Kernfusion als Energiequelle der Zukunft

Betreuender Fachlehrer: Herr Großkopf

Belegarbeit im Fach Physik, Grundkurs Physik im Schuljahr 2004/05,
Wiprecht-Gymnasium Groitzsch

Nico Klingner, April 2005

Aufgabenstellung

Im Jahre 1975 hatte man die Hoffnung, dass im Jahre 2000 ein erstes Fusionskraftwerk in Betrieb gehen wird. Heute spricht man von einem Probebetrieb frühestens nach 2035!

1. Beschreiben und vergleichen Sie den Aufbau und die Wirkungsweise eines Kernfusionsreaktors mit einem konventionellen Reaktor eines Kernkraftwerkes! Gehen Sie auf Vorteile und Nachteile der jeweiligen Reaktoren genauer ein! (Wählen Sie sich dabei einen Reaktortyp selbst aus!)
2. Welche Schwierigkeiten haben in den letzten Jahrzehnten zu einer derartigen Verschiebung des Zieltermins für eine Inbetrieb geführt?
3. Skeptiker vergleichen den Fusionsreaktor in der Öffentlichkeit immer wieder mit der Wasserstoffbombe. Sie malen das Szenario einer atomaren Verseuchung an die Wand. Setzen Sie sich mit der entstehenden Strahlenbelastung eines konventionellen Atomkraftwerkes und eines Fusionskraftwerkes auseinander und vergleichen Sie diese!

Kernfusion als Energiequelle der Zukunft

Vorwort	4
1. Die Kernfusion allgemein	4
1.1 Kernfusion in der Sonne	5 – 6
1.2 Physikalische Erklärung	6 – 7
1.3 Nutzungsmöglichkeiten der Kernfusion	7
2. Kernfusionsanlagen	8
2.1 Das Fusionsmaterial	8
2.2 Fusion durch Trägheitseinschluss	8 – 9
2.3 Fusion durch magnetischen Einschluss	9
2.3.1 Methoden zur Aufheizung	9 – 10
2.3.2 Der Stellarator	10
2.3.3 Der Tokamak	11 – 12
3. Vergleich Kernfusion und Kernspaltung	12
3.1 Der Druckwasserreaktor als konventioneller Kernreaktor	12 – 13
3.2 Vergleich Druckwasserreaktor mit Tokamak	14
3.3 Vergleich Radioaktivität	15 – 16
4. Probleme der Kernfusion	16
Nachwort	17
Fachbegriffe	18 – 19
Quellen	19

Vorwort

Es ist seltsam, dass die meisten Menschen in unserer Umgebung nichts über Kernfusion wissen, obwohl indirekt ihr Leben davon abhängt. Die Sonne sendet durch Kernfusion Energie aus, welche dann durch die Photosynthese in chemische Energie des Zuckers umgewandelt wird und die dann über Nahrungsketten in Ihren Körper kommt. Die Energie, die Sie zum Lesen dieser Facharbeit benötigen, stammt letztendlich aus dem Wasserstoff der Sonne, weshalb ich denke, dass man mehr über Kernfusion erfahren sollte, vor allem jetzt, da Umweltprobleme wie der Treibhauseffekt uns langfristig zur Suche nach alternativen Energiequellen zwingen. Ziel der Facharbeit soll es sein, einen Überblick zu geben und über Funktionsweise und Aufbau von Fusionskraftwerken, sowie über Vor- und Nachteile und über die möglichen Gefahren zu informieren.

1. Die Kernfusion allgemein

Kernfusion ist eigentlich ein Prozess, bei dem zwei Atomkerne zu einem schwereren Atomkern verschmelzen. Dabei werden große Energiemengen frei, sowie je nach Art der Fusion auch elektromagnetische Strahlung oder andere Teilchen. Die Energie wird in Form von Wärme oder in Form von kinetischer Energie der Teilchen frei. Diese entstandenen Teilchen stoßen gegen andere Atome, welche durch den Aufprall beschleunigt werden. Somit haben die Atome eine größere kinetische Energie, was man letztendlich als Wärme bezeichnet.

Die beschleunigten Atome treffen jetzt auf andere Atome und wenn dies mit einer gewissen Geschwindigkeit passiert, vereinigen sich ihre Atomkerne zu einem Einzigen. Dabei wird wieder soviel Energie frei, dass es zu einer Kettenreaktion kommt. Die Geschwindigkeit ist zur Überwindung der Abstoßungskräfte der positiv geladenen Protonen notwendig. Wenn die Protonen aber bis auf 0,1 Picometer, also ein Zehntel eines Billionstel Meters, aneinander kommen, setzt die starke Wechselwirkung zwischen den Protonen und Neutronen ein, die diese mit sehr großer Kraft zusammenhält. Zur Erläuterung: die starke Wechselwirkung ist eine der vier fundamentalen Wechselwirkungen neben der Gravitation und der elektromagnetischen Wechselwirkung.

Damit es dazu kommt, könnte man den Druck enorm erhöhen, bei einer sehr hohen Temperatur arbeiten oder die Atome auf große Geschwindigkeiten beschleunigen. Um die Abstoßungskräfte zu verdeutlichen, ist zu sagen, dass beispielsweise bei der Verschmelzung der Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium bei Normaldruck eine Reaktion erst bei einer Temperatur von 100 Millionen Grad ablaufen würde. Dabei müsste die Temperatur eigentlich noch höher sein. Durch die ungleichmäßige Energieverteilung, die Ludwig Boltzmann entdeckte, haben aber auch bei einer niedrigeren Temperatur einige wenige Teilchen eine ausreichend hohe kinetische Energie, die für die Auslösung der Kettenreaktion ausreicht.

Bei solch hohen Temperaturen (ab etwa 20.000°C) wird ein Gas ionisiert. Es wird zum Plasma, was bedeutet, dass sich die Elektronen eines Atoms vom Atomkern lösen. Es entstehen positiv geladene Ionen und freie Elektronen. Dieser vierte Aggregatzustand tritt natürlich auf unserer Erde nur in Blitzen auf, er macht jedoch circa 90 Prozent der Materie in unserem Universum aus (zum Hauptanteil in Sternen.)

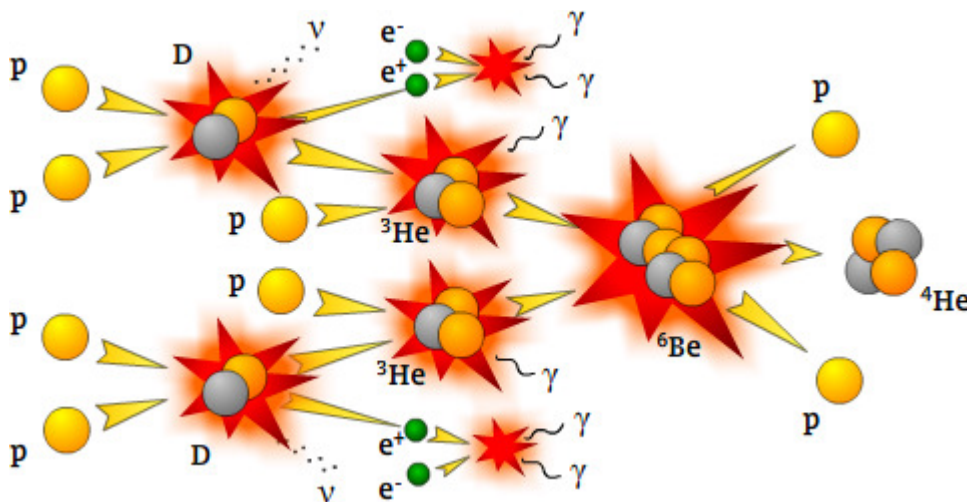
1.1 Kernfusion in der Sonne

Der Atomkern eines Wasserstoffatoms, also ein Proton, verschmilzt während der Kernfusion im Inneren der Sonne mit anderen Protonen. Diese Reaktion nennt man Proton-Proton-Reaktion. Als Fusionsprodukt entsteht ein Deuteriumkern, welcher aus einem Neutron und einem Proton besteht. Bei der Fusion werden zwei Positronen frei und es tritt Gammastrahlung auf.

Ein Positron gehört zur Antimaterie und besitzt die Masse eines Elektrons, wobei seine Ladung den gleichen Betrag hat, nur dass das Positron ein positives, und das Elektron ein negatives Vorzeichen hat. Wenn ein Positron und ein Elektron aufeinander treffen löschen sie sich aus, wobei Gammastrahlung frei wird.

Gammastrahlung ist eine elektromagnetische Strahlung, die eine noch kleinere Wellenlänge hat als die Röntgenstrahlung.

Der entstandene Deuteriumkern verschmilzt nun wieder unter Aussendung von Gammastrahlung mit einem Proton zu einem Heliumisotop mit nur einem Neutron. Dieses Isotop wird als Helium 3 bezeichnet, da die Masse seines Kerns 3u beträgt. u ist die atomare Masseneinheit und beträgt rund $1,66 \times 10^{-24}$ g, was einem Trillionstel Gramm, also einem Attogramm entspricht. Das natürlich vorkommende und stabilere Helium hat zwei Neutronen im Kern und so eine Masse von 4. Das Helium 3 verschmilzt nun zu Beryllium 6, was aber unter Aussendung von zwei Protonen in Helium 4 zerfällt. Die Reaktion kann durch das folgende Schema verdeutlicht werden.

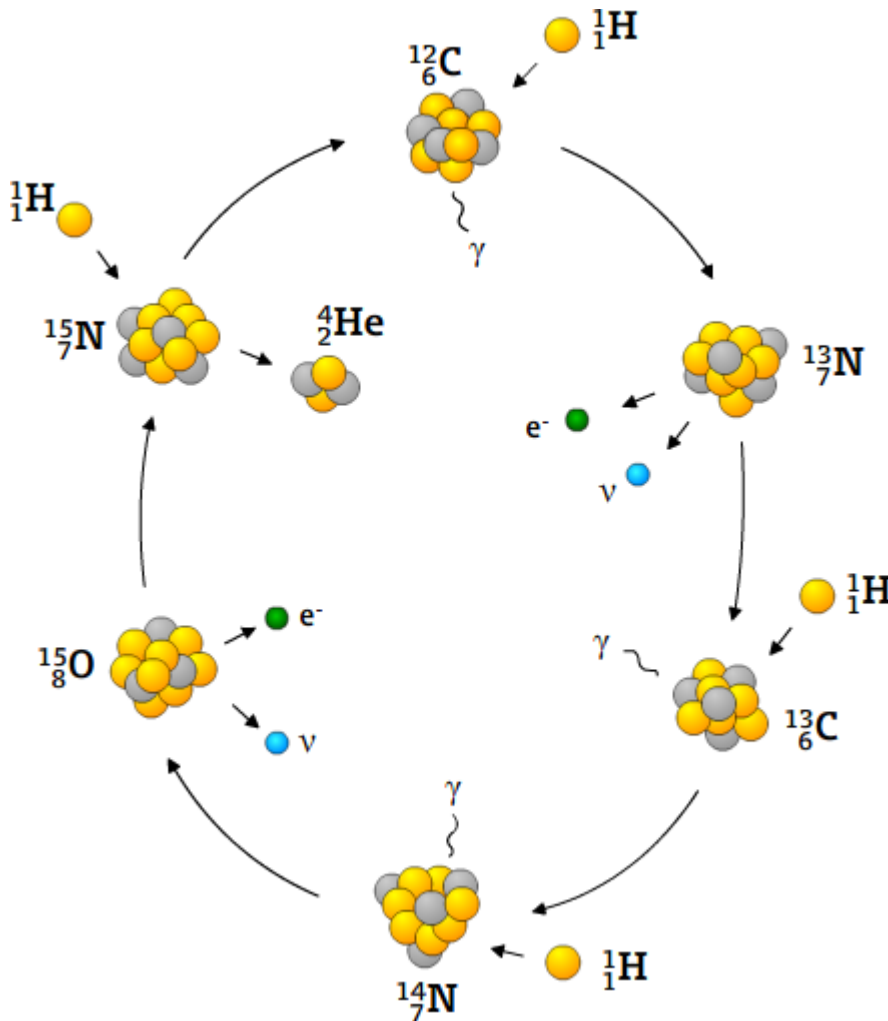


»In unserer Sonne findet diese Reaktion so unglaublich oft und schnell statt, dass nicht nur Billionstel Gramm Wasserstoff, sondern 600 Millionen Tonnen in einer Sekunde verschmelzen. Als Produkt entstehen 596 Millionen Tonnen Helium, woraus sich der Massedefekt von rund 4 Millionen Tonnen ergibt.«

(Daten: erkenntnishorizont.de bei Kernfusion im Überblick)

In anderen Sternen läuft die Fusion mit C-12 ab. Das C-12 verschmilzt mehrmals mit einem Proton zu verschiedenen Kohlenstoff- und Stickstoffisotopen, welche dann unter Aussendung von Beta- und Gammastrahlung wieder zerfallen. Die Größe des Kerns nimmt dabei zu, bis er schließlich wieder zu einem C-12 Kern und einem Heliumkern zerfällt.

Diese Reaktion heißt Bethe-Weizsäcker-Zyklus und kann durch das folgende Schema beschrieben werden.



1.2 Physikalische Erklärungen

Woher der Massedefekt kommt, lässt sich wie folgt erklären:

Die potenzielle Energie der Nukleonen ist in einem Atomkern geringer als im freien Zustand, woraus aus dem Energieerhaltungssatz folgt, dass die Energie in eine andere Form umgewandelt wurde. Diese Energie entspricht der Kernbindungsenergie, welche in Bewegungsenergie umgewandelt wird. Die Masse der Ausgangsstoffe und die Masse der beschleunigten Produkte ist noch gleich, da ein Körper in Bewegung eine größere Masse hat, als in Ruhe. Die Masse der Ausgangsstoffe in Ruhe ist nun größer als die Masse der Produkte in Ruhe. Der Massedefekt entspricht also der kinetischen Energie der Reaktionsprodukte.

Der Massedefekt lässt sich durch die Äquivalenzgleichung $E=mc^2$ von Albert Einstein in Energie umrechnen. Da c der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum entspricht und diese im Quadrat steht, ergibt sich eine gewaltige Energie aus einer relativ kleinen Masse. Bei einem Massedefekt von 4 Millionen Tonnen entspricht das einer Energie von rund 360 Billionen Gigajoule ($3,6 \times 10^{26}$ J) die in einer Sekunde entsteht. Das entspricht der Energie, die bei der Explosion von 88 Billionen Tonnen TNT oder die bei der Detonation von 4,4 Millionen Hiroshimabomben frei werden würde. Wenn man die gleiche Energie durch Verbrennung von Kohle erzielen möchte, müsste man 10 Billionen Tonnen Kohle in einer Sekunde verbrennen. Die Kernfusion in unserer Sonne produziert in circa einer Stunde und 50 Minuten eine Energie, die genauso groß ist, als wenn wir einen Kohlekörper der Masse unseres Mondes verbrennen würden.

1.3 Nutzungsmöglichkeiten der Kernfusion

Wenn Sie sich nun fragen, wie man diese gewaltigen Energiemassen nutzen kann, kann ich Ihnen sagen, dass wir schon einen Bruchteil direkt oder indirekt nutzen.

Sonnenkollektoren beispielsweise nutzen die Sonneneinstrahlung, um durch thermische oder photoelektrische Prozesse Strom zu erzeugen.

Außerdem gelangt die Energie in Form von Licht auf unsere Erde. Das Licht wird beim Auftreffen auf die Erdoberfläche, je nach Reflexionsvermögen mehr oder weniger, reflektiert oder absorbiert. Wird es absorbiert, geben die Atome der Erdoberfläche die Energie wieder in Form von langwelliger Infrarotstrahlung ab. Die infrarote Strahlung regt die Moleküle der Luft zum Schwingen an, wodurch sie sich erwärmt. Durch den unterschiedlichen Einfallswinkel entstehen warme oder kalte Gebiete und somit auch Hoch- oder Tiefdruckgebiete. Es kommt folglich zum Druckausgleich, den wir als Wind bezeichnen und welchen wir in Windmühlen nutzen. Die Windenergie stammt also letztendlich auch von der Kernfusion.

Wasserkraftwerke nutzen ebenso die Energie der Kernfusion, da erst die Sonneneinstrahlung zur Verdunstung des Wassers und zum Transport durch die Wolken führt. Die potentielle Energie des Wassers stammt also auch aus der Energie der Sterne. Durch die Photosynthese wird die Sonnenenergie in chemische Energie umgewandelt, welche wir dann durch chemische Prozesse wieder freisetzen. Fossile Brennstoffe, Holz oder Nährstoffe sind also Speicher von Solarenergie.

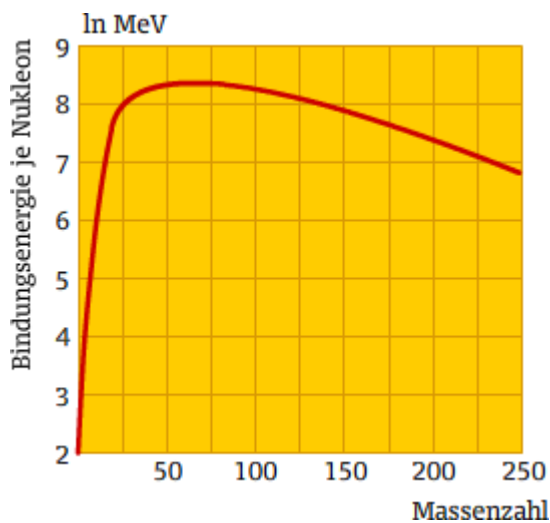
Kernkraftwerke nutzen hochmolekulare Elemente, die erst durch die Verschmelzung von Atomen in einem Stern entstanden sind. Letztendlich beruhen alle vom Menschen genutzten Energiequellen auf der Kernfusion, wobei sie aber alle nur einen winzigen Bruchteil des riesigen Potenzials nutzen.

Viel effektiver wäre eine Kernfusion auf der Erde, die wir ohne Umwege und große Verluste nutzen können. Eine Lösung sind Kernfusionskraftwerke, worauf ich nun konkret eingehe.

2. Kernfusionsanlagen

2.1 Das Fusionsmaterial

Bevor ich zur technischen Realisierung der Kernfusion komme, muss geklärt werden, welcher Stoff zur Fusion gebracht wird. Der Wasserstoffzyklus in der Sonne eignet sich nicht für die Kernfusion auf der Erde, da er nur relativ langsam abläuft, da mehrere Reaktionen gleichzeitig ablaufen und da relativ viel Gammastrahlung auftritt. Schwerere Atome wie Sauerstoff, Kohlenstoff oder Kupfer haben wegen ihrer größeren Masse auch eine viel höhere Kernbindungsenergie, wodurch eine technische Realisierung der Fusion viel schwieriger wäre.



Viel besser wäre eine Fusion von Wasserstoffisotopen, da Wasserstoff im Meerwasser nahezu unbegrenzt vorliegt, und da sich durch Neutronenbeschuss relativ einfach Wasserstoffisotope herstellen lassen. Die Kernbindungsenergie wäre ebenfalls niedrig, wodurch sich eine Fusion einfacher realisieren ließe.

Als besonders geeignet erwies sich die Fusion von schwerem Wasserstoff (Deuterium) und überschwerem Wasserstoff (Tritium). Deuteriumkerne, kurz Deuteronen, besitzen ein Proton und ein Neutron. Tritiumkerne, kurz Triton, besitzen zwei Neutronen und ein Proton.

Bei der Fusion von Deuterium und Tritium entstehen Helium 4 und ein Neutron. Die Energie, die frei wird, beträgt fast 4 Promille, was vergleichsweise sehr effektiv ist.

Da nun geeignetes Fusionsmaterial gefunden ist, entsteht die Frage, wie man die Fusion realisiert.

Momentan gibt es drei realisierte Arten einer Fusionsanlage, den Tokamak, den Stellarator und Reaktoren, die Fusion durch Trägheitseinschluss erreichen.

2.2 Fusion durch Trägheitseinschluss

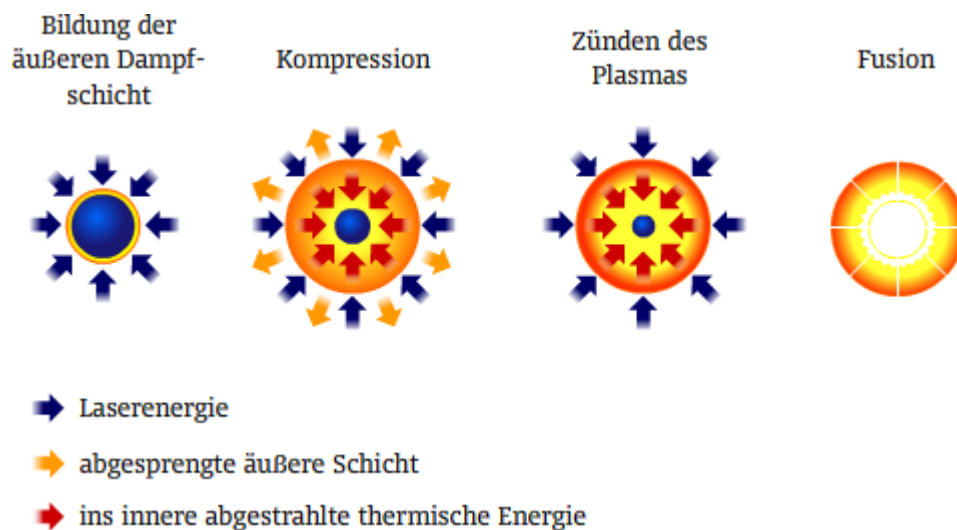
Bei der Kernfusion mittels Trägheitseinschluss werden Tritium und Deuterium in eine Hülle aus schweren Metallen eingeschlossen, ein so genanntes Pellet. Die Metalle Blei und Gold bieten sich wegen ihren Eigenschaften an. Quecksilber hat zum Beispiel eine hohe Dichte, es ist aber auch giftig und bei Zimmertemperatur flüssig.

Das Pellet hat dabei durchschnittlich einen Durchmesser von 2 Millimetern.

Der Vorgang läuft dabei in vier Phasen ab. Erst wird die vorbereitete Kugel mit starken

Lasern bestrahlt, wodurch die Hülle aus Metall verdampft wird. Dadurch wird das Gas vorgeheizt und durch die Volumenausdehnung verdichtet, wodurch ein Druck von 1012 bar entsteht. Um vergleichen zu können: der Luftdruck auf der Erde beträgt nur rund 1 bar.

In Phase zwei wird weiter durch Laser aufgeheizt, wodurch das Gas in den Plasmazustand übergeht, was ungefähr 10^{-9} Sekunden dauert. Anschließend wird das Plasma bei einer Temperatur von 100 Millionen Grad Kelvin durch Laser gezündet. In Phase vier fusioniert das Plasma, was ein Vielfaches der investierten Energie liefert.



Ein Nachteil ist die kurze Einschlusszeit. Für diese Methode spricht jedoch, dass immer nur kleine Mengen fusioniert werden, wodurch das Gefahrenpotential kleiner wird. Außerdem ist ein Regulieren der Leistung einfach möglich, wobei nicht Unmengen an Energie verschwendet werden.

2.3 Das magnetische Einschlussverfahren

Beim magnetischen Einschlussverfahren gibt es zwei Reaktortypen, die sich durchgesetzt haben. Den Stellarator und den Tokamak.

Beim magnetischen Einschlussverfahren wird ein großes Volumen enorm erhitzt, in das dann zusätzlich noch Fusionsmaterial eingeleitet werden kann. Das Plasma wird dabei durch starke Magnetfelder auf Bahnen gelenkt, sodass es keinen Kontakt mit den Wänden der Plasmakammer hat, da diese sofort schmelzen oder verdampfen würden. Zur Heizung des Gasgemisches gibt es drei Möglichkeiten.

2.3.1 Methoden zur Aufheizung

Eine Methode ist die Hochfrequenzheizung, bei der Radiowellen mit circa 30 MHz oder Mikrowellen mit Frequenzen um 140 GHz auf das Gas über Sendeantennen gestrahlt werden.

Die Mikrowellenstrahlung nähert sich langsam dem Frequenzbereich der Infrarotstrahlung und dem Frequenzbereich des Lichtes. Dadurch kann diese Strahlung nicht mehr über Antennen oder Wellenleiter gelenkt werden, sondern über Spiegel. Die Plasmateilchen absorbieren dann die Energie der Strahlung.

Geeignete Frequenzen versetzen die Atomkerne und die Elektronen in eine Kreisbewegung um die Magnetfeldlinien.

»Die Kreisfrequenzen der Atome betragen zwischen 10 und 100 MHz und die Kreisfrequenz der Elektronen liegt zwischen 60 und 150 GHz.«

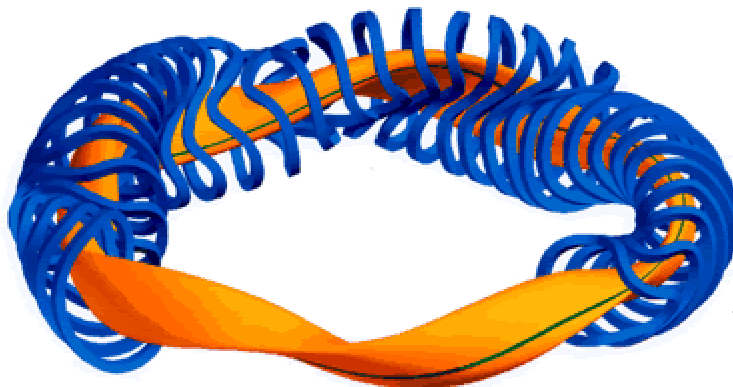
(siehe erkenntnishorizont.de unter Technologische Prinzipien der Kernfusion)

Das zweite Prinzip ist die Neutralteilchenheizung, bei der Ionen durch elektrische Felder enorm beschleunigt werden, welche dann auf ein neutrales Gas treffen. Dabei gibt das Ion seine kinetische Energie an ein neutrales Atom teilweise ab. Das beschleunigte, neutrale Atom kann nun ungehindert durch das Magnetfeld des Reaktors hindurch. Trifft es dann auf das Plasma, geht die kinetische Energie des Atoms auf ein Ion des Plasmas über. Da das Atom beim Aufprall mit Elektronen und Ionen ionisiert wird, verhält es sich wie das Plasma. Alle Atome, die durch das Neutralteilchen beschleunigt wurden, stoßen nun gegen andere Plasmateilchen, die dann ebenso beschleunigt werden. Das geschieht so lange, bis die kinetische Energie des Neutralteilchens sich auf viele Ionen „verteilt“ hat. Da die kinetische Energie aller Teilchen der Wärme entspricht, steigt die Temperatur im Plasma. Diese Methode eignet sich besonders zum Zünden (Eintritt der Kernfusion) des Plasmas.

Die dritte Methode ist die Ohmsche Heizung, die aber nur im Tokamak zum Einsatz kommt. Der Strom, der im Plasma des Tokamak induziert wird, hat einen günstigen Nebeneffekt: da das Plasma einen Widerstand besitzt, geht ein Teil der elektrischen Energie in Wärme über. Bei steigender Temperatur nimmt jedoch dieser Widerstand ab, weshalb dieses Prinzip nur zur Heizung des Plasmas unter 10 Millionen Kelvin möglich ist.

2.3.2 Der Stellerator

Der Stellerator baut sein Magnetfeld nur durch äußere Spulen auf. Um dem Plasma eine Verdrillung und somit Stabilität zu geben, ist eine sehr komplexe Form und Anordnung der Spulen notwendig. Dadurch, dass kein Kreisstrom des Plasmas – wie beim Tokamak – notwendig ist, ergeben sich gleich zwei Vorteile. Es ist ein Dauerbetrieb möglich und der Stellerator hat eine höhere Stabilität. Trotz allem hat sich der Tokamak durchgesetzt, da die ohmsche Heizung viel günstiger ist als die Neutralteilchenheizung und die Hochfrequenzheizung. Ein Stellerator ist zum Beispiel der Wendelstein 7-X des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik.

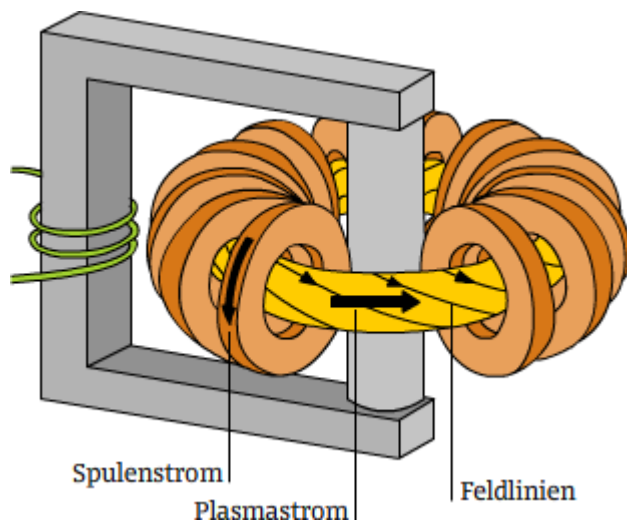


Bildquelle: Wikipedia » Wendelstein 7-X

2.3.3 Der Tokamak

Tokamak ist eigentlich eine russische Abkürzung für »toroidalnaja kamera magnitnoj katuschki« und bedeutet soviel wie *Toroidale Kammer im Magnetfeld der Spule*.

Der Tokamak weist Ähnlichkeiten mit dem Stellarator auf, er besitzt jedoch eine zusätzliche Spule, deren Eisenkern senkrecht durch die Mitte des Torus führt. Solange sich die Stärke des Magnetfeldes ändert, wird in dem Plasma ein Kreisstrom induziert, welcher für die Verdrillung des Plasmas verantwortlich ist. Diese Verdrillung sorgt im Tokamak für seine Stabilität. In der folgenden Abbildung ist ein Schema eines stark vereinfachten Tokamaks zu sehen.

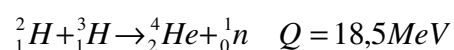


Da das Magnetfeld nicht unbegrenzt ansteigen kann, müsste man es abschalten und es erneut hochfahren. Die Abschaltung des Magnetfeldes hätte aber zur Folge, dass es sich schlagartig entlädt.

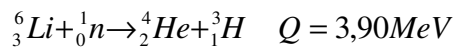
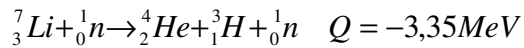
»Bei einem Demonstrations-Reaktor namens ITER (geplantes Tokamakprojekt von China, Europa, Japan, Korea und Russland) würde soviel Energie frei werden, wie bei der Detonation von fast 2500 Kilogramm TNT frei wird.«
(erkenntnisshorizont.de unter Forschungsreaktoren)

Deswegen muss das Magnetfeld langsam und kontrolliert heruntergefahren werden, weshalb nur kurze Reaktionszeiten möglich sind. Den Rekord hält der Reaktor JET (ein Projekt europäischer Länder) mit einer Brenndauer von nur einer Sekunde. In dieser Sekunde wurde dennoch soviel Energie frei, um die Energie zu decken die zum Aufheizen des Plasmas nötig war. Zukünftige Reaktoren müssten also noch größer sein um wirtschaftlich zu arbeiten, was jedoch enorm kostspielig ist.

Da Deuterium und Tritium zusammen drei Neutronen besitzen, Helium 4 aber nur zwei, wird ein Neutron bei der Fusion abgespalten, was man in der folgenden Gleichung sehen kann:



Das Neutron besitzt den Großteil der freiwerdenden Energie, wobei diese hauptsächlich kinetische Energie ist. Da das Neutron sehr leicht ist, und da die Geschwindigkeit im Quadrat umgekehrt proportional zur Masse ist, wird es enorm beschleunigt. Dieses Neutron kann ungehindert aus dem Magnetfeld heraus, da es elektrisch neutral ist. Günstig ist dabei, dass Lithium bei Neutronenbeschuss zu stabilem Helium 4 und Tritium zerfällt. Bei Lithium 7 wird zusätzlich ein Neutron frei. Der superschwere Wasserstoff geht dann in den Fusionsprozess mit ein. Die Gleichungen für diese Reaktionen lauten:



3. Vergleich Kernfusion und Kernspaltung

3.1 Ein konventioneller Kernreaktor am Beispiel des Druckwasserreaktors

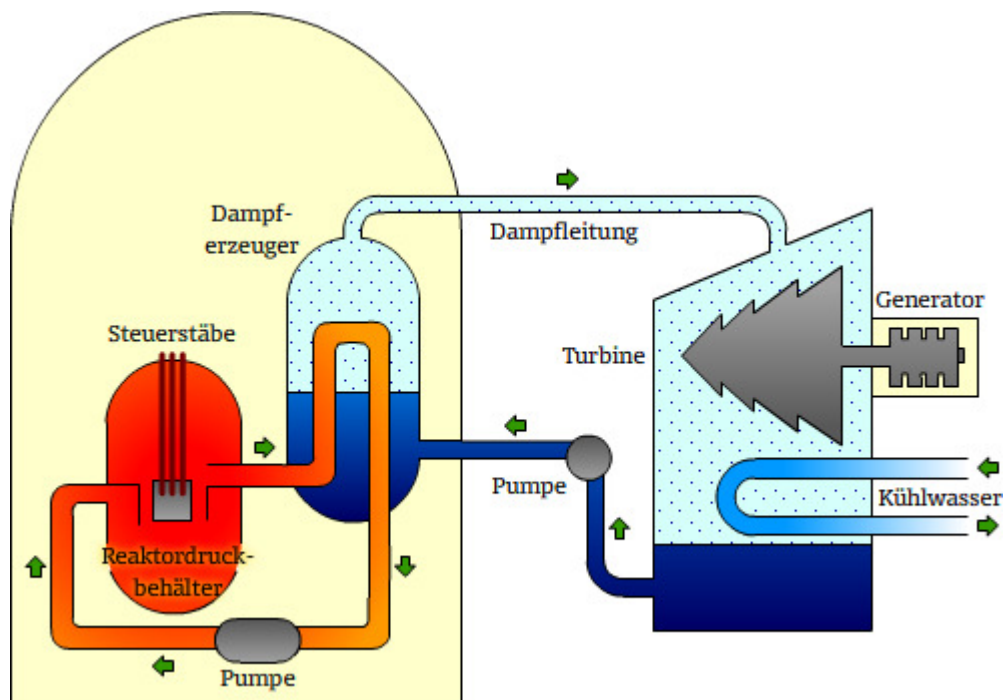
Kernspaltung ist ein Vorgang, bei dem durch Außeneinwirkung ein Atom zum Zerfall gebracht wird. Aus einem schweren Atom entstehen mehrere leichtere Atome.

Bei einem konventionellen Kernreaktor, beispielsweise dem Druckwasserreaktor, werden Uran- oder Plutoniumstäbe mit Neutronen angereichert, wodurch sie angeregt und instabil werden. Diese Stoffe haben eine sehr kleine Halbwertszeit, wodurch sie bald wieder zerfallen. Dabei entstehen meist zwei Stoffe mit einem Massenverhältnis von 2:3 und zusätzlich zwei oder drei freie Neutronen mit einer hohen kinetischen Energie. Diese Neutronen würden eine Kettenreaktion auslösen, weshalb sie mittels eines Moderators aufgefangen werden müssen. Der Moderator kann Neutronen aufnehmen und später wieder abgeben. Er befindet sich in Steuerstäben und kann bei Bedarf in den Reaktor oder aus dem Reaktor gefahren werden, wodurch eine kontrollierte Reaktion möglich ist. Mögliche Stoffe für Moderatoren sind Graphit, Wasser, schweres Wasser, Cadmium, Bor oder Gadolinium.

Man muss die Steuerstäbe so einsetzen, dass vor und nach der Spaltung gleich viele Neutronen vorliegen. Führt man einen Moderator ein, der noch keine Neutronen aufgenommen hat, so liegen nach der Spaltung weniger Neutronen vor, wodurch sich die Reaktion verlangsamt, bis sie zum Stillstand kommt. Will man die Leistung steigern, fährt man die Steuerstäbe aus dem Reaktor heraus, wodurch die neu entstandenen Neutronen nicht mehr absorbiert werden.

Die vom Reaktorraum abgestrahlte Wärme wird über Wasserkühlungen abgeführt. Bei Temperaturen von 300 bis 350° Celsius würde jedoch das Wasser verdampfen, was man aber wegen Instabilität, schlechter Kontrollmöglichkeiten und anderen Risiken verhindern will. Deshalb wird ein hoher Druck von ca. 160 bar auf das Wasser ausgeübt, wodurch es flüssig bleibt. Dieses primäre Kühlsystem wird durch ein sekundäres Kühlsystem geleitet, welches ebenfalls Wasser enthält. Da dieses aber unter einem „niedrigen“ Druck von 70 bar steht, verdampft es bei ca. 280° Celsius. Der Dampf wird über Leitungen zu einer Turbine geführt, die einen Generator antreibt. Anschließend wird das Wasser aus dem Sekundärkreislauf durch Kühlwasser auf 30 bis 35° Celsius abgekühlt und über Pumpen wieder in den Kreislauf eingeleitet.

Ein Schema des Druckwasserreaktors wird in der folgenden Abbildung gezeigt.



13 Druckwasserreaktoren sind momentan in Deutschland in Betrieb. In der folgenden Tabelle sind technische Daten des Kernkraftwerks Isar 2 abgebildet.

Thermische Reaktorleistung:	3950 MW
Elektrische Leistung:	1475 MW = 37 %
Anzahl der Brennelemente:	193
Anzahl der Brennstäbe pro Brennelement:	ca. 300
Aktive Brennstablänge:	3,90 m
Durchmesser des Reaktorkerns:	ca. 3,60 m
Gesamtes Urangewicht:	103 t

3.2 Vergleich Druckwasserreaktor mit Tokamak

Wenn man die Reaktoren vergleicht, gibt es nur wenige Gemeinsamkeiten. Sie nutzen beide die Kernenergie, welche als Wärme abgegeben wird. Die Wärme wird dann bei beiden über Wärmetauscher und Generatoren in elektrische Energie umgewandelt. Außerdem ist noch zu sagen, dass Kernspaltung und Kernfusion relativ junge Projekte sind. Nicht zu vergessen ist, dass beide Reaktoren auch sehr kostspielig sind. Nach den wenigen Gemeinsamkeiten folgen nun die Unterschiede in Form einer Tabelle:

	Druckwasserreaktor	Tokamak
Art des Prozesses	Kernspaltung	Kernverschmelzung
Reaktionsmaterial	Uran oder Plutonium	Wasserstoffisotope
Gewicht des RM	100 Tonnen	< 0,5 kg
Reaktordurchmesser	3,60 m	5,92 m
Energie pro kg RM	$2,1 \times 10^{12}$ J	$3,4 \times 10^{14}$ J
typ. Temperatur	800°C	100- 200 Millionen °C
gewonnene Energie	1475 MW = 37 % der thermischen Reaktorleistung	16 MW bei JET 500 MW Plan bei ITER
Gefahren	Kühlwasserversagen, was zur Kernschmelze führen könnte. Betonmantel könnte durchschmelzen, was zur atomaren Verseuchung führt (wie in Tschernobyl.)	Versagen der Supraleitung durch Ausfall der Spulen-Kühlung, was zum Ausfallen des Magnetfeldes führen könnte, mit einer Sprengkraft von 2500 kg TNT
Vorteile	steuerbarer Zerfall, derzeit leichter realisierbar, Dauerbetrieb, relativ niedrige Temperaturen	geringe Radioaktivität, nahezu unbegrenzter Vorrat an Brennstoff, sehr wenig Brennstoff nötig, weshalb ein Durchbrennen nicht möglich ist
Nachteile	hohe Radioaktivität, Lagerung des Abfalls ist immer unsicher, mehrere Tonnen Uran nötig, Reaktion kann außer Kontrolle geraten, Transport des Abfalls unsicher, Anschläge richten großen Schaden an, begrenzter Vorrat an Brennmaterial, Proteste erschweren Abtransport des radioaktiven Materials, entstandenes Plutonium kann in Form einer Atombombe missbraucht werden	Hohe Temperaturen, hohe Entwicklungskosten, Aufheizen des Plasmas verbraucht sehr viel Energie, Dauerbetrieb ist schwer realisierbar

3.3 Vergleich Radioaktivität

Bei einem Tokamak wäre die Strahlenbelastung viel kleiner als bei einem Atomkraftwerk, da sich nur wenig Reaktionsmaterial im Reaktor befindet. Das radioaktive Tritium würde sich verflüchtigen, wobei es nach Schätzungen nicht einmal zur Evakuierung kommen würde. Außerdem beträgt die Halbwertszeit von Tritium nur 12 Jahre. Nach einhundert Jahren wäre nur noch $1/1024$ des Tritiums vorhanden. Probleme macht der Mantel des Reaktors, da der durch den Neutronenbeschuss radioaktiv wird. Einen Lithiummantel, müsste man aber trotzdem „nur“ aufarbeiten und circa 100 Jahre zwischenlagern, bis man ihn wieder verwenden könnte. Vorteilhaft wäre ein Mantel, der nur schwer aktivierbar ist, da so der radioaktive Abfall auf ein Minimum zurückfallen würde. Ob Kernfusionsreaktoren in Zukunft umweltfreundlich arbeiten, hängt davon ab, ob man einen geeigneten Mantel findet.

Bei einem Kernreaktor müssen nach einiger Zeit die Brennstäbe ausgetauscht werden. Diese werden aufgearbeitet und können dann noch einmal verwendet werden. Da Deutschland keine eigene Wiederaufbereitungsanlage besitzt, müssen die Brennstäbe nach Windscale/Sellafield in Großbritannien oder nach La Hague in Frankreich gebracht werden. Wenn die Brennstäbe aber nicht mehr aufbereitet werden können, werden sie zwischengelagert. Sie werden meist in speziellen Behältern in ein Bergwerk gefahren, wo sie mit Beton eingehüllt werden. Eisenbergwerke eignen sich besonders gut, da Eisen mögliche Strahlung teilweise absorbiert. Da Uran 235 allerdings eine Halbwertszeit von 10^8 Jahren hat, ist ein sicheres Lagern auf Dauer so gut wie unmöglich. Erstens zerfallen Beton und andere Materialien viel eher als Uran und außerdem besteht die Erdkruste aus tektonischen Platten. Wo einst ein Bergwerk war, kann in Millionen Jahren ein Vulkan sein. Der Berg kann durch Erosion komplett abgetragen werden, bis das Uran freiliegt. Oder wird ein Erdbeben den Beton aufsprengen und somit zum Austritt des radioaktiven Materials führen? Niemand kann das vorhersagen und deshalb ist niemand vor dem radioaktiven Abfall sicher und wird es auch nie sein.

Wie gerade erläutert ist die radioaktive Belastung durch den Abfall schon bei Normalbetrieb erschreckend hoch, doch was ist, wenn es zur unkontrollierten Kernschmelze und einem Austritt kommt?

»Dieser nächste GAU (Größter anzunehmender Unfall) tritt nach heutigen Untersuchungen wahrscheinlich in 10.000 bis 30.000 Jahren ein. Das Strahlungsdosisäquivalent ist ein Maß für die vom Körper aufgenommene Strahlungsmenge. Manche Strahlung wird dabei besser aufgenommen und wird in die Berechnung mit einbezogen. Die Einheit ist Sievert (Sv) oder J/kg und beträgt natürlich 1,1 mSv, wozu noch 0,6 mSv durch technische Gerät und 0,2 mSv durch Tschernobyl hinzukommen. Die Besatzung eines Flugzeugs (durch kosmische Strahlung) und ein Arbeiter aus der Atomindustrie sind circa 4,5 mSv ausgesetzt. 1-2 Sievert lösen Strahlenkrankheiten aus und 6 Sv sind für einen Menschen tödlich.«
(Quelle: Microsoft Encarta Enzyklopädie 2005)

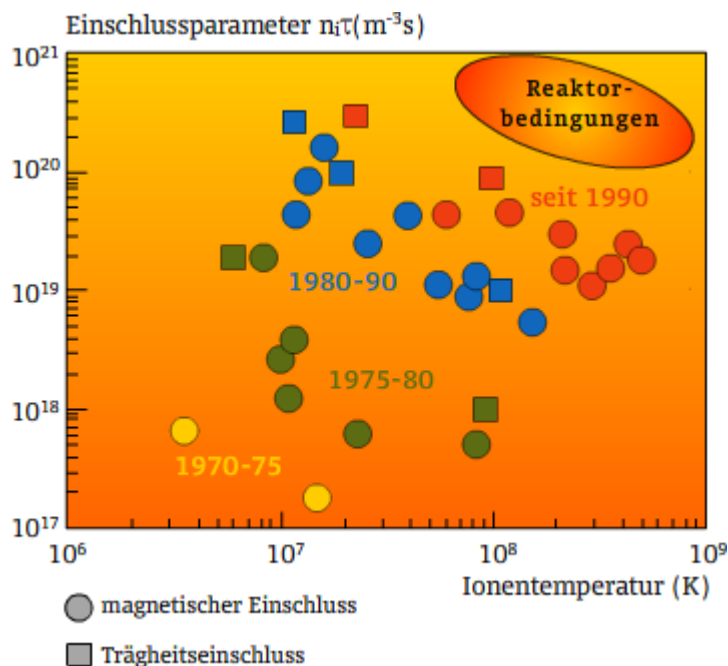
Bei dem Supergau in Tschernobyl wurden acht Tonnen Uran aus dem Reaktor geschleudert, weshalb tausende Quadratkilometer um den Reaktor belastet wurden. 30 Menschen starben sofort und eine Million Menschen wurden durch die Strahlung stark belastet. Eine Wolke mit radioaktivem Material zog nach Westen bis nach Mitteleuropa und Skandinavien. Krankheiten wie Leukämie und Krebs sind die Folge der Strahlung.

Ein Beispiel: die Wahrscheinlichkeit für die Kinder in Gebieten der Ukraine und Weißrussland, an Schilddrüsenkrebs zu erkranken, stieg um den Faktor 100. Circa 35% der Fläche der Ukraine sollen unbewohnbar sein.

4. Probleme der Kernfusion

Damit ein Reaktor wirtschaftlich arbeitet, muss die gewonnene Energie größer sein als die Energie, die zum Aufheizen des Plasmas notwendig war. Damit dies zutrifft, muss das Produkt aus Dichte, Temperatur und Einschlusszeit einen gewissen Wert überschreiten. Dieser Wert hat sich in den vergangenen 40 Jahren um den Faktor 25000 verbessert.

In dem unten gezeigten Diagramm kann man erkennen, wie wirtschaftlich ältere Reaktoren arbeiteten.



Im Jahre 1975 nahm man an, dass im Jahre 2000 das erste Fusionskraftwerk in Betrieb gehen würde. Was zu einer Verschiebung eines solchen Termins geführt hat, lässt sich wie folgt erklären:

Die Einschlusszeit war deutlich kürzer als man erwartet hatte. In den letzten Jahren hat man zeigen können, dass Turbulenzen im Plasma zu einem erhöhten Energieverlust führen. Dies resultierte darin, dass heutige Anlagen viel größer und komplexer sind als man früher erwartet hatte.

Ein weiterer Grund ist, dass Plasmaverunreinigungen, die durch Wechselwirkungen mit den umgebenden Wänden entstehen, dem Plasma Energie entziehen, wodurch ebenfalls die Einschlusszeit sinkt. Es erwies sich ebenfalls als schwierig, unterschiedlich schwere Teilchen im Magnetfeld zu kontrollieren, da schwerere Teilchen zum äußeren Rand abdriften. Die Projekte sind außerdem sehr kostenintensiv mit Milliarden von Euro. Wenn keine finanziellen Probleme, Kriege oder Katastrophen die Entwicklung der Kernfusion einschränken oder gar stoppen, hoffe ich, dass in den nächsten 50 Jahren das erste Fusionskraftwerk in Betrieb gehen wird.

Nachwort

Das Thema Kernfusion ist sehr aktuell und interessant, weshalb es sich für mich gelohnt hat, mich zu informieren. Beim Lesen von Artikeln sind immer wieder Fremdwörter aufgetaucht, was meinen Wissensdurst manchmal gesteigert hat. Mit dieser Facharbeit habe ich versucht, das Wichtigste relativ einfach zu erklären, Zahlen durch Beispiele zu verdeutlichen, aber auch konkrete Sachen fachlich korrekt darzustellen. Als besonders schwierig erwies es sich, Zahlen zu erfassen, da wegen der Aktualität des Themas eine Fülle von Quellen vorhanden war, von denen sich jedoch manche als veraltet erwiesen.

Fachbegriffe

Alphastrahlung	Strahlung, die meist aus positiv geladenen Helium 4 Kernen besteht.
Atome	Elektrisch neutrale Teilchen, die durch chemische Reaktionen nicht teilbar sind. Das Atom besteht aus einem positiv geladenen Atomkern, um den Elektronen in bestimmten Bahnen „kreisen“.
Atomkern	Teil eines Atoms, der aus Protonen und bei den meisten Elementen auch aus Neutronen besteht.
Betastrahlung	Strahlung, die aus Elektronen und Positronen besteht
Deuterium	Wasserstoffisotop mit einem Neutron im Kern
Deuteron	Atomkern des Deuteriums
Element	Ein Element ist der Sammelbegriff für Atome mit gleicher Protonenanzahl.
Elektron	Ein elektrisch negativ geladenes Teilchen, das bei chemischen Reaktionen eine große Rolle spielt
Frequenz	Die Anzahl der Schwingungen in einem bestimmten Zeitintervall. Bei der Einheit Hertz beträgt dieser Zeitintervall eine Sekunde.
Gammastrahlung	Elektromagnetische Strahlung mit hoher Energie, die beim radioaktiven Zerfall entstehen kann. Gammastrahlung ist sehr gefährlich und kann zu Krebs führen.
Halbwertszeit	Der Zeitraum, in dem ein Stoff zur Hälfte in andere Stoffe zerfallen ist.
Isotope	Atome eines Elements mit einer unterschiedlichen Neutronenanzahl
JET	Joint European Torus – Ein Experimentalreaktor eines Tokamaks, der aus der Zusammenarbeit europäischer Länder hervorgegangen ist. JET ist momentan der größte und modernste Tokamak der Welt.
Lichtgeschwindigkeit	Die Lichtgeschwindigkeit ist die größte mögliche Geschwindigkeit und beträgt im Vakuum 299 792 Kilometer pro Sekunde.
Potenzielle Energie	Form der Energie, die ein Körper aufgrund seiner Lage besitzt. Ein Mann auf einem Berg hat eine höhere potenzielle Energie als der selbe Mann in einem tiefer gelegenen Tal.
Kernfusion	Physikalischer Prozess, bei dem leichte Atomkerne zu schwereren Atomkernen verschmelzen.
Kinetische Energie	Energie, die ein Körper aufgrund seiner Bewegung hat. Ein schneller, schwerer Körper hat eine hohe kinetische Energie.
Neutron	Elektrisch neutrales Teilchen, das zum Zusammenhalt des Atomkerns beiträgt.
Plasma	Vierter Aggregatzustand nach dem Gas, bei dem sich der Atomkern unabhängig von seinen Elektronen bewegt.

Positron	Elektrisch positiv geladenes Teilchen, wobei der Betrag der Ladung des Positrons mit dem Betrag der Ladung des Elektrons übereinstimmt.
Proton	Bestandteil des Atomkerns. Es ist positiv geladen und seine Anzahl im Kern bestimmt die Art des Elements.
Radioaktivität	Eigenschaft eines Stoffes, die angibt, dass der Stoff in andere Elemente zerfällt.
Stellerator	Fusionsreaktor, genaueres erscheint in Punkt 2.3.2
TNT	Abkürzung für Trinitrotoluol, eine chemische Verbindung, die als Sprengstoff eingesetzt wird.
Tokamak	Fusionsreaktor, genaueres erscheint in Punkt 2.3.3
Tritium	Wasserstoffisotop mit zwei Neutronen im Kern
Triton	Atomkern des Tritium

Quellen

- erkenntnishorizont.de
- weltderphysik.de
- schulen.regensburg.de
- wikipedia.de
- ws105.zfn.uni-bremen.de
- heise.de
- stmugv.bayern.de
- netzwelt.de
- oedp.de

Außerdem diente die Microsoft Encarta Enzyklopädie Professionell 2005 als Nachschlagewerk und Quelle.

Folgende Bücher wurden ebenfalls als Quelle verwendet:

- Formelsammlung vom Paetec Verlag die 4. Auflage.
Das Jahr des Druckes ist 2004.
- Formeln und Tabellen für die Sekundarstufen 1 und 2 vom Paetec Verlag die 3. Auflage. Das Jahr des Druckes ist 1993.
- Chemie Sekundarstufe 2 vom Verlag Volk und Wissen die 1. Auflage.
Das Jahr des Druckes ist 1996.
- Physik Gymnasiale Oberstufe vom Verlag Paetec die erste Auflage.
Das Jahr des Druckes ist 2004.