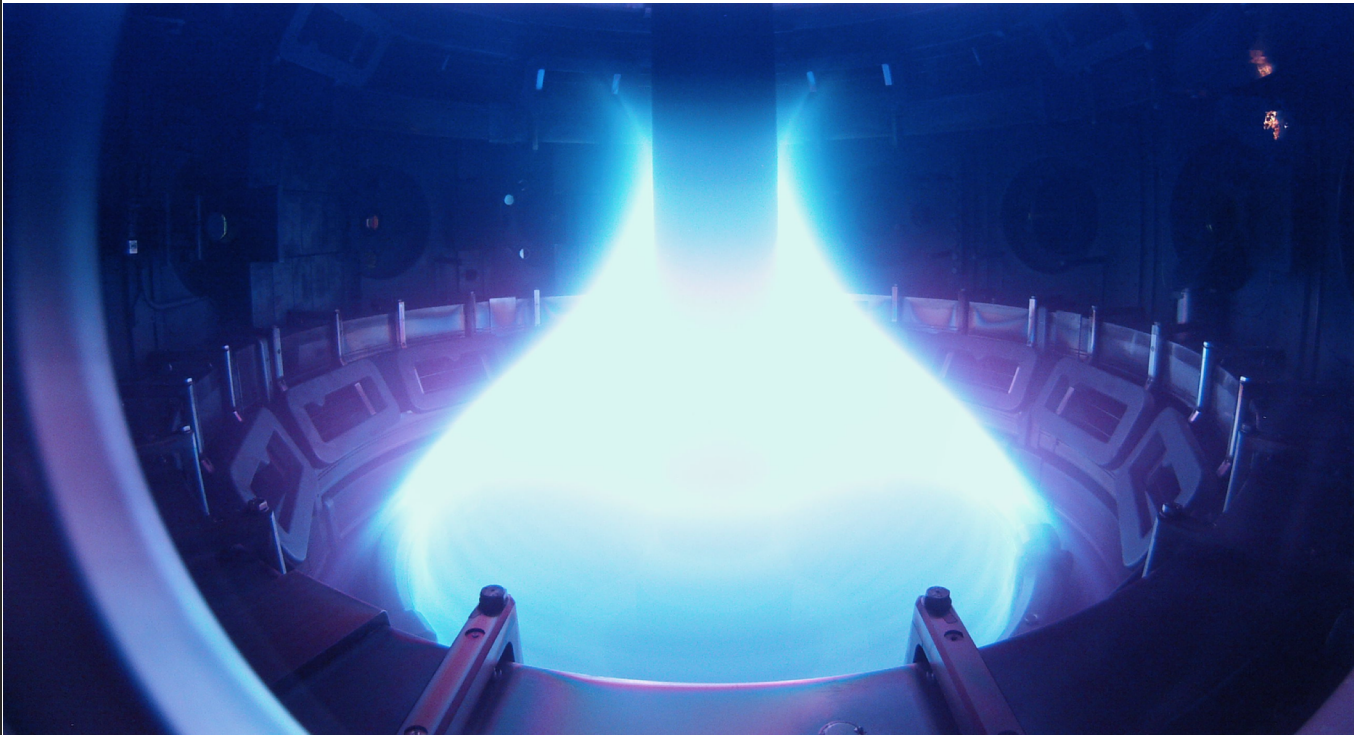


KERNFUSION

Die Energiequelle der Zukunft?



Eingereicht von: Timur Strohbach

Gymnasium am Markt Achim

Seminarfach Bunte

2020

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	2
2. GRUNDLAGEN	3
3. KERNFUSION	5
3.1 KALTE FUSION	6
3.2 THERMONUKLEARE KERNFUSION.....	7
3.2.1 <i>Der Trägheitseinschluss</i>	8
3.2.2 <i>Magnetischer Einschluss</i>	10
4. FUSIONSREAKTOREN	11
4.1 DAS TOKAMAK-KONZEPT	13
4.2 DER STELLERATOR.....	14
5. WIRTSCHAFTLICHE UND POLITISCHE ASPEKTE DER KERNFUSION	14
5.1 SICHERHEIT	14
5.2 WEITERE KOSTEN	15
5.3 POTENZIAL DER DURCH KERNFUSION FREIGESETZTEN ENERGIE	15
5.4 BRENNSTOFFMATERIAL	16
6. FAZIT	16
7. ANHANG	18
8. LITERATURVERZEICHNIS	22
9. EINVERSTÄNDNISERKLÄRUNG	24

1. Einleitung

Energie ist die neue fundamentale Währung unseres Universums¹. Sie heizt unsere Wohnungen, bringt unsere Autos zum Fahren und lädt unsere Akkus. Derzeitig wird Energie auf viele unterschiedliche Arten gewonnen. Wir spalten Atome, speichern Windenergie oder verbrennen fossile Brennstoffe. Jede dieser Methoden hat jedoch gravierende Nachteile. Kernenergie produziert Atommüll², es gibt derzeitig keine Akkus, die ausreichend Windenergie für mehrere windstille Tage speichern können. Fossile Brennstoffe sind nicht nur, nur begrenzt verfügbar, sondern setzen zudem CO₂ frei³.

Kernfusionsreaktoren wurden bereits 1920 von Arthur Eddington als eine mögliche Energiequelle vorgeschlagen⁴. 1934 gelang Mark Oliphant die erste im Labor durchgeführte Kernfusion. Jedoch wurde die Kernfusion anfangs hauptsächlich zur Waffenherstellung erforscht. Während des Kalten Krieges, im Jahre 1952, gelang die erste durch Kernfusion herbeigeführte Freisetzung von immensen Mengen an Energie in der Wasserstoffbombe „Ivy Mike“⁵. Auch wenn das Konzept der Fusion seitdem weiter erforscht wird, ist es uns aber immer noch nicht möglich mittels Fusionstechnologie Energie zu gewinnen. Es muss also Hürden geben, welche die Umsetzung eines Fusionskraftwerks äußerst umständlich, wenn nicht sogar unmöglich machen. Worum handelt es sich bei der Kernfusion und warum lässt sie sich kaum realisieren? Kann Fusionstechnologie die Energiequelle der Zukunft sein? Sollten weitere Ressourcen in die Erforschung der Fusionsreaktoren fließen? Die folgende Arbeit soll diese Fragen beantworten.

Damit diese Fragen verständlich beantwortet werden können, wird sich diese Facharbeit auf die Arten der Kernfusion konzentrieren. Am Anfang werden ein paar Grundlagen, welche als Hintergrundwissen für das Verständnis unabdingbar sind,

¹ Altun, Atila: „Die Währung der Zukunft heißt Energie“, in: Der Tagesspiegel, 29.11.2007, <https://www.tagesspiegel.de/politik/erneuerbare-energien-die-waehrung-der-zukunft-heisst-energie/1108970.html>, 17.03.2020

² M. S. Dresselhaus; I. L. Thomas: Alternative energy technologies, in: insight overview, 15.11.2001, S. 334

³ Ebenda, S. 333

⁴ So schreibt EUROfusion in: <https://www.euro-fusion.org/de/fusion/geschichte-der-fusionsforschung/>

⁵ So schreibt comprehensive nuclear-test-ban treaty organization in: <https://www.ctbto.org/specials/testing-times/1-november-1952-ivy-mike>

erklärt. Darauf folgt das Konzept der Fusion, wieso diese so schwer herbeizuführen ist und wie man die Atomkerne dennoch zum Fusionieren bringt.

Die letzten Kapitel behandeln das Prinzip eines potenziellen Fusionsreaktors sowie die Wirtschaftlichen Vor-/Nachteile einer solchen Struktur. Aufgrund der Grenzen dieser Arbeit kann hier jedoch nur knapp auf die wichtigsten Aspekte eingegangen werden. Abschließend kommt ein Fazit, ob es letztendlich effizient wäre weitere Ressourcen in die Forschung der Fusionskraftwerke zu investieren, um damit dem Klimawandel entgegenzuwirken, beziehungsweise ob die Erforschung anderer Energiequellen nicht vorteilhafter wäre.

2. Grundlagen

Um mit dem Grundprinzip der Kernfusion anfangen zu können, müssen erst einmal ein paar Dinge als Grundwissen vorausgesetzt werden. Angefangen mit dem Aufbau des Atommodells, weitergeführt vom Verhalten einer Materie im plasmatischen Zustand und einer Erläuterung zur Bindungsenergie abschließend mit einer Erklärung zu toroidalen und poloidalen Bewegungen.

Um die alle folgenden Schritte verstehen zu können, muss man mit dem Aufbau eines Atoms vertraut sein. Man berücksichtige hier, dass es sich lediglich um ein sehr stark vereinfachtes Atommodell handelt und keineswegs die genaue Struktur eines Atoms beschreibt. Atome bestehen aus drei Einheiten: dem positiv geladenen Proton, dem negativ geladenen Elektron sowie dem neutralen Neutron. Die Protonen und Neutronen bilden den Kern bzw. Nukleus, daher werden sie auch Nukleonen genannt⁶. Um den Kern herum befinden sich die Elektronen. Man kann es sich wie ein Sonnensystem vorstellen. Unser Kern bildet hierbei die Sonne unseres Systems und die Elektronen umkreisen ihn wie es die Planeten bei der Sonne machen würden (siehe Abb. 1). Die Atome sind zudem generell neutral geladen, sprich die Anzahl ihrer Elektronen und Protonen ist gleich. Die Anzahl ihrer Neutronen kann jedoch variieren, was als Isotopie bezeichnet wird. Isotope haben chemisch nahezu identische Fähigkeiten können aber in ihrer Masse sowie gespeicherten Energie stark variieren.

⁶ Scharf, Reiner: Das Farbenbeispiel der Protonenmasse. 26.11.2008. <https://www.faz.net/aktuell/wissen/physik-mehr/nukleonen-das-farbenspiel-der-protonenmasse-1728804.html>, 02.03.2020

Materie ändert ihren Aggregatzustand und somit auch ihre Eigenschaften je nach Temperatur und Druck. Im Alltag begegnen wir täglich Feststoffen, Flüssigkeiten und Gasen, es gibt jedoch noch einen weiteren, vierten Aggregatzustand das sogenannte Plasma⁷. Plasmen sind, in unserem alltäglichen Umfeld, kaum anzutreffen da sie äußerst hohe Temperaturen benötigen, jedoch werden sie im Verlauf dieser Arbeit eine essenzielle Rolle spielen. Erreicht eine Materie den plasmatischen Zustand wird das zuvor genannte Atommodell gänzlich zerstört, die Atomkerne bewegen sich nun vollkommen unabhängig von ihren Elektronen. Nach außen hin wirkt das Plasma jedoch weiterhin neutral.⁸

Wie bereits erklärt wird ein Atomkern aus Nukleonen gebildet. Allerdings ist die Masse des Atomkerns geringer, als die Summe der Massen der Nukleonen, aus denen der Nukleus. Der Widerspruch besteht nun darin, dass Masse weder zerstört noch erschaffen werden. Wie also kommt diese Massendifferenz zustande? Ein Teil der Masse wurde in Energie umgewandelt, welche den Kern zusammenhält. Die Erklärung dafür befindet sich in der Formel, von der sie mit Sicherheit schon einmal gehört haben. $E = m * c^2$ Einsteins Formel beschreibt die Äquivalenz von Masse zu Energie⁹. Bei der Entstehung eines Atomkerns wird somit ein Teil seiner Masse in Energie umgewandelt und als elektromagnetische Welle abgestrahlt oder als Bewegungsenergie freigesetzt. Die Stärke der frei werdenden Energie hängt jedoch von den fusionierenden Elementen und ihrem Fusionsprodukt ab (siehe Abb. 2). Die durch die Massendifferenz herbeigeführte Energiegewinnung kann allerdings durch Fusion sowie Fission (Kernspaltung) erreicht werden. Bei ersterem werden mehrere leichte Kerne mit geringer Bindungsenergie zu einem größeren Kern mit höherer Bindungsenergie fusioniert. Im umgekehrten Fall steht die Fission, bei der ein schwerer Atomkern in kleinere aufgespalten wird und es ebenfalls Energie entsteht, da die Produkte eine höhere Bindungsenergie aufweisen.

Toroidale sowie poloidale Richtungen. Ein Torus ist ein mathematischer Körper, welcher durch die Drehung eines senkrecht stehenden Kreises um eine vertikale Achse entsteht. Oder auch ein Körper der vergleichbar mit

⁷ Spatschek, Karl-Heinz: Theoretische Plasmaphysik: Eine Einführung. Stuttgart: Teubner Studienbücher 1990, S. 7

⁸ Stroth, Ulrich. Plasmaphysik: Phänomene, Grundlagen, Anwendungen. Heidelberg: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011, S. 9

⁹ Scharf, Reiner: Das Farbenbeispiel der Protonenmasse. 26.11.2008. <https://www.faz.net/aktuell/wissen/physik-mehr/nukleonen-das-farbenspiel-der-protonenmasse-1728804.html>, 02.03.2020

dem eines Donuts ist (siehe Abb. 3). Bewegt sich ein Körper toroidal, so handelt es sich um eine Bewegung, entlang der Kreisachse des Toruses und auf dessen waagerechter Ebene verläuft (blauer Pfeil). Das Wort „Poloidal“ hingegen, beschreibt eine Bewegung, die sich auf einer Kreisbahn, senkrecht zum Torus um diesen bewegt (roter Pfeil).

3. Kernfusion

Kernfusion ist die Energiequelle des Universums. Sie ist nicht nur der Grund, warum unsere sowie auch jede andere Sonne Energie ausstrahlt, sondern ist ebenfalls für die Existenz aller Elemente bis auf Wasserstoff verantwortlich¹⁰. Bei der Kernfusion wird, wie der Name schon sagt, durch die Fusion mehrerer kleiner Atomkerne in einen größeren Kern Energie freigesetzt, solange dieser eine höhere Bindungsenergie aufweist. Wie Abbildung 2 zu entnehmen bieten sich die Wasserstoff Isotope Deuterium und Tritium an, da die energetische Differenz zwischen ihnen und dem Produkt ihrer Fusion sehr groß ist. Nur gibt es bei der Umsetzung ein immenses Problem. Die Kerne sind, wie schon erklärt, grundsätzlich positiv geladen und stoßen sich mit immenser Kraft voneinander ab. Diese Kraft wird Coulomb Kraft genannt und kann mit

$$U = \frac{Z_1 * Z_2 * e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Berechnet werden, wobei Z_1 und Z_2 für die Ordnungszahlen der fusionierenden Elemente, e für die Elementarladung, ϵ_0 für die elektrische Feldkonstante und r für den Abstand stehen¹¹. Überwinden sie dennoch den Abstand weniger Kernradien, wirkt eine zusätzlich anziehende Kraft, welche die Fusion ermöglicht¹². Den Atomkernen ist es folglich nur dann möglich zu fusionieren, wenn sie die Ladungsabstoßung überwinden können und sich nah genug kommen. Stellen Sie sich als Vergleich eine Kugel vor, welche vor einem Berg steht. Hinter diesem Berg ist ihr Ziel (in unserem Falle die Fusion). Unsere Kugel hat nun einerseits die Option den Berg zu

¹⁰ Baker, Joanne: 50 Schlüsselideen Physik, Kernfusion. Spektrum Akademischer Verlag 2009¹, S. 140

¹¹ Schuhmacher, Uwe: Kernfusion, Eine Einführung. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1993¹, S. 6

¹² Wesselbaum, Dennis: Kernfusion: Die vernachlässigte Alternative. Kiel: Institut für Weltwirtschaft 2011¹, S. 1

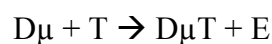
überwinden, was Energie kostet, da sie davor beschleunigt werden müsste. Andererseits könnte man einen Tunnel für die Kugel bauen und müsste diese nicht beschleunigen. Beim Überwinden der Ladungsabstoßung ist es nicht anders.

Um die Ladungsabstoßung zu überwinden gibt es somit zwei Möglichkeiten:

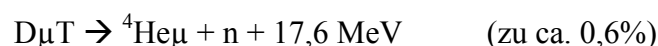
- Kalte Fusion mit der Hilfe eines Katalysators (bau eines Tunnels)
- Thermonukleare Fusion (beschleunigen der Teilchen/Kugel)

3.1 Kalte Fusion

Um Fusionen zu katalysieren, wird ein Elementarteilchen namens Myon benutzt. Ein Myon besitzt die Eigenschaften eines Elektrons nur ist ca. 200mal schwerer¹³. Myonen kommen auf natürliche Weise in der Atmosphäre vor, sie entstehen durch die Atome, welche durch die dort herrschende radioaktive kosmische Strahlung ionisieren. Sie können aber genauso gut im Labor erzeugt werden. Eine von Myonen katalysierte Fusion kann bei niedrigen Temperaturen stattfinden. Wenn das Myon in eine Kammer, welche mit Tritium sowie Deuterium befüllt ist, eindringt, gibt es seine Energie fast vollkommen ab und bildet ein $T\mu$ - oder ein $D\mu$ -Atom. Dies geschieht mit einer Geschwindigkeit von ca. 10^{-9} Sekunden und ist somit relativ schnell. Da die genannten μ -Atome äußerst klein sowie neutral sind, können sie problemlos an Wasserstoffmoleküle herankommen und ein myonisches Molekül bilden¹⁴.



Nach dieser Reaktion dauert es nur Bruchteile einer Sekunde, bis es innerhalb des $D\mu T$ -Moleküls zur Fusion kommt.



Das Myon liegt dabei, wie für Katalysatoren üblich, am Ende der meisten Fusionen in unveränderter Form vor und wäre daher in der Lage weitere Fusionen zu katalysieren. Auch wenn es sich mit 0,6% lediglich um eine geringe Möglichkeit handelt,

¹³ Schulz, Joachim: Joachims Quantenwelt. 17.10.2003.

<http://www.quantenwelt.de/elementar/myonen.html>, 03.02.2020

¹⁴ Schuhmacher, Uwe: Kernfusion, Eine Einführung. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1993¹, S. 11

dass das Myon am ${}^4\text{He}$ haften bleibt und für weitere Reaktionen unbrauchbar wird. Das Problem ist jedoch, dass die Kosten, die beim Erschaffen eines Myons, mit derzeitig etwa 3GeV äußerst hoch sind und die Lebensdauer eines Myons gerade einmal für eine Fusion reicht. Da selbst mit idealen Bedingungen die Energiebilanz, mit ca. 0,1667 negativ wäre, wurde die kalte Fusion für die Energiegewinnung als nicht realisierbar deklariert¹⁵.

3.2 Thermonukleare Kernfusion

Eine Alternative zur kalten Fusion bildet die Thermonukleare Fusion, die lukrativer erscheint. Sie arbeitet mit einer Herangehensweise, welche sich vollkommen von der kalten Fusion unterscheidet. Hier wird nicht versucht die Coulomb Kraft zu umgehen, sondern sie zu überwinden. Die Teilchen brauchen also eine extreme Geschwindigkeit, um einander nah genug kommen. Spricht man bei Teilchen von Geschwindigkeiten, ist die Temperatur des Stoffes gemeint, in dem sie sich befinden.

Die Temperaturen, welche für eine Fusion notwendig sind, starten bei ca. 10keV. Wobei 1keV einer Temperatur von 11,605 Millionen Kelvin entspricht¹⁶. Wasserstoff liegt in solchen Temperaturen als Plasma vor. Zudem muss die Brennmaterie eingeschlossen sowie isoliert werden. Also muss eine Brennmaterie mit der Teilchendichte n , in einem Volumen, mit einer Temperatur T , für eine möglichst hohe Zeitdauer τ eingeschlossen sein¹⁷. Hierzu muss beachtet werden, dass es sich nicht um ein reines Plasma, sondern um eine Mischung von Tritium und Deuterium handelt (D-T-Gemisch). Davon ausgehend, dass in dem Gemisch 50% Deuterium ($\frac{1}{2} = n_D$) und 50% Tritium ($\frac{1}{2} = n_T$) vorhanden sind, hat jedes Teilchen somit die Energiemenge $\frac{3}{2} kT$ (Plasma Energiedichte)¹⁸. Für das Erhitzen des Plasmas gilt Folglich:

$$Q_H = 2n \frac{3}{2} k * T = 3n * k * T$$

Und für die während der Zeitdauer τ freigesetzte Energie:

¹⁵ Strauss, Karl: Kraftwerkstechnik, zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativen Energiequellen. Dortmund: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016⁷, S. 443

¹⁶ Schuhmacher, Uwe: Kernfusion, Eine Einführung. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1993¹, S. 13

¹⁷ Menglong, Zhao: Towards a More Complete Description of Tokamak Edge Plasmas: SOLPS Simulations with Kinetic Electron Effects. Technische Universität München 2018, S. 1f

¹⁸ Strauss, Karl: Kraftwerkstechnik, zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativen Energiequellen. Dortmund: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016⁷, S. 443

$$Q_F = \frac{1}{2} n * \frac{1}{2} n * \langle \sigma * v \rangle * E * \tau = \frac{n^2}{4} \langle \sigma * v \rangle * E * \tau$$

Wobei k für die Boltzmann-Konstante, σ für den Wirkungsquerschnitt und v für die Geschwindigkeit der Teilchen steht¹⁹. Um mit diesem Konzept Energie zu gewinnen, sprich eine positive Energiebilanz zu haben, muss $Q_H < Q_F$ entsprechen.

$$2n \frac{3}{2} kT < \frac{n^2}{4} \langle \sigma * v \rangle * E * \tau$$

Bzw.

$$\frac{12kT}{\langle \sigma * v \rangle * E} < n * \tau$$

Betrachtet man die Temperatur, die das einzuschließende Plasma haben muss, merkt man sofort, dass ein normaler „Käfig“ keine Option ist. Dennoch gibt es für den Einschluss des Plasmas viele Möglichkeiten. Die Forschungen konzentrieren sich aber hauptsächlich auf zwei Methoden²⁰. Dem Trägheitseinschluss sowie dem Magnetischem Einfluss. Teilchenbeschleuniger sind hier leider keine Option, da sich die Teilchen dabei nicht in einem Volumen, sondern einer linearen Bewegung befinden würden und es somit zu einer Ableitung der Teilchen anstelle einer Fusion kommen würde²¹.

3.2.1 Der Trägheitseinschluss

Bei dem Trägheitseinschluss wird versucht, die Bedingung $Q_F > Q_H$ einzuhalten, indem n möglichst auf Höchstwerte gebracht wird²². In anderen Worten, es wird nicht versucht, die Teilchen möglichst lange reagieren zu lassen, sondern möglichst viele Teilchen in kurzer Zeit. Das D-T-Gemisch wird hierbei mit äußerst starken Lasern oder Ionenstrahlen sehr schnell auf die für eine Fusion erforderlichen Temperaturen erhitzt²³. Das sich erhitzende Plasma wird hierbei lediglich von seiner eigenen Trägheit zusammengehalten. Da dies aber nicht für längere Zeit der Fall ist, ist es bei der Trägheitsfusion kaum möglich die Einschlusszeit τ zu erhöhen.

¹⁹ Ebenda, S. 443

²⁰ Menglong, Zhao: Towards a More Complete Description of Tokamak Edge Plasmas: SOLPS Simulations with Kinetic Electron Effects. Technische Universität München 2018, S. 2

²¹ Schuhmacher, Uwe: Kernfusion, Eine Einführung. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1993¹, S. 13

²² Strauss, Karl: Kraftwerkstechnik, zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativen Energiequellen. Dortmund: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016⁷, S. 461

²³ Schuhmacher, Uwe: Kernfusion, Eine Einführung. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1993¹, S. 18

Die immense Teilchendichte n wird durch Hilfe sogenannter Pellets erreicht²⁴. Pellets sind Hohlkugelchen welche mit unserem Brennstoff gefüllt werden (siehe Abb. 4). „Dieses Einfüllen bewerkstelligt man vorher dadurch, indem man ein winziges Hohlkugelchen bei erhöhter Temperatur einer Wasserstoffatmosphäre unter Hochdruck ausgesetzt hat“²⁵. Durch Einwirkung des Lasers auf die äußere Schicht des Pellets kommt es im inneren Teil des Pellets zu einer Implosion, welche die Dichte sowie Temperatur des Brennstoffs erhöht. Im Zentrum des Pellets werden somit die Bedingungen für eine Fusion erreicht und ein Teil des Brennstoffs fusioniert. Um die freigesetzte Energie aufzufangen, ist in großem Abstand um das Pellet ein Reaktorgefäß, welches das Pellet umgibt. Dort wird die Energie aufgefangen und weiter in einen thermischen Kreislauf geleitet. Damit es jedoch zu einer Zündung kommt, müssen die Laser- bzw. Ionenstrahlen höchst präzise angepasst werden. Es muss vermieden werden, dass der Brennstoff bereits am Anfang durch eine Stoßwelle erhitzt wird und sich dessen Entropie erhöht. Es muss, innerhalb des Pellets, eine Temperatur von mindestens 5keV herrschen, was ungefähr 58 Millionen Kelvin entspricht, damit die Mindesttemperatur erreicht wird. Zudem muss das Produkt aus dem Radius R , des Pellets und der Massendichte p den Wert 4 übersteigen.

$$p * R > 4$$

Die Einschusszeit, welche durch die Massenträgheit erreicht wird, kann mithilfe der Zeit errechnet werden, welche die Schallwelle für die Strecke des Radiuses benötigt. Da die Welle sich mit der Schallgeschwindigkeit

$$v = \left(\frac{2 * k_B * T}{m_{DT}} \right)^{0.5}$$

bewegt. Wobei m_{DT} der mittleren Masse von Deuteron und Triton entspricht. Somit beträgt die Einschusszeit $\tau_E = R/v$ ²⁶. Da die Abbrandrate Φ aber ebenfalls in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit mit der die Teilchen fusionieren

²⁴ Menglong, Zhao: Towards a More Complete Description of Tokamak Edge Plasmas: SOLPS Simulations with Kinetic Electron Effects. Technische Universität München 2018, S. 2

²⁵ Schuhmacher, Uwe: Kernfusion, Eine Einführung. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1993¹, S. 18

²⁶ Ebenda, S. 19 f.

$\tau_F = 2m_{DT}/(\langle\sigma v\rangle * p)$ zusammenhängt. Betrachtet man also eine kurze Einschusszeit, fusioniert ein Bruchteil, der zu dem Verhältnis $Rv \sim \frac{\tau_E}{\tau_F}$ proportional ist ergibt sich:

$$\Phi = \frac{pR}{H_o + pR}$$

Mit $H_o = \frac{8m_{DT}}{\langle\sigma v\rangle v_s} \cong 70kg * m^{-2}$ bedeutet es, dass, um eine Abrennrate von 25% zu erreichen, sich ein Pellet mit 1 mg Brennstoff, laut der Dichte, schon lange im flüssigen Zustand befinden muss. Im Zusammenspiel mit der extrem hohen Temperatur bilden sich dann Drücke von 20 Peta Pa, welche mit denen im Zentrum eines Sternes zu vergleichen sind. Auf dem Schema der Trägheitsfusion basieren die heutigen Wasserstoffbomben, die Startbedingungen, werden jedoch nicht durch einen Laser, sondern durch eine Kernspaltung geschaffen²⁷.

3.2.2 Magnetischer Einschluss

Im Gegensatz zu der Trägheitsfusion wird beim Magnetischen Einschluss eine möglichst hohe Einschusszeit angestrebt. Normale Materialien kommen aus dem Grund nicht infrage, da das Plasma bei geringstem physischem Kontakt sofort abkühlt. Wie der Name bereits sagt, wird um dies zu verhindern, der Brennstoff bei extremen Temperaturen mittels Magnetfelder eingeschlossen. Im Plasma sind wie bereits genannt die Atome aufgebrochen und die Elektronen bewegen sich frei von den Atomkernen. Daher kommt es dazu, dass das Plasma nach außen hin neutral erscheinen mag, sich aber dennoch nur aus geladenen Teilchen zusammensetzt. Schafft man nun mittels Spulen Magnetfeldlinien, bewegen sich die Teilchen um diese Magnetfeldlinien in einer Gyrationbewegung²⁸. Stellen Sie sich einen Draht vor, der um etwas wie ein Rohr gewickelt wird (siehe Abb. 5). Die Generatoren, die auf dem Konzept, des magnetischen Einschlusses beruhen, lassen sich in Lineare und toroidale unterteilen.

Lineare oder auch offene Magnetfelder sind vergleichbar mit einem Zylinder, in dessen inneren sich das Plasma aufhält. Problematisch ist hierbei nur, dass das Plasma ohne besondere Endverschlüsse die Möglichkeit hat aus dem Zylinder auszutreten. Als vielversprechendste Lösung dieses Problems dient die sogenannte

²⁷ Strauss, Karl: Kraftwerkstechnik, zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativen Energiequellen. Dortmund: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016⁷, S. 461

²⁸ Schuhmacher, Uwe: Kernfusion, Eine Einführung. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1993¹, S. 22

Spiegelmaschine. Dabei besteht die Magnetfeldkonfiguration aus einem im mittleren Bereich homogenes Magnetfeld, welches in Richtung der beiden Enden stark ansteigt. Durch die Veränderung des Magnetfeldes werden die Teilchen somit gespiegelt und ändern ihre Richtung. Durch Coulombstöße, welche zwischen den Teilchen ablaufen gehen jedoch trotzdem Teilchen und somit Energie verloren. Mit diesem Konzept konnte zwar ein stabiles und dichtes Plasma erzeugt werden jedoch scheiterte es am Erreichen der nötigen Temperaturen.

Als alternative Anordnung der Magnetfelder steht das Prinzip des toroidalen Plasmaeinschlusses. Hierbei bewegen sich die Teilchen, obwohl sie räumlich beschränkt sind unendlich lange in einer Vorwärtsbewegung, indem die Magnetfeldlinie mit einer Kreislinie gleichzusetzen ist, welche um den Kreismittelpunkt des Toruses rotiert. Man stelle sich als Verdeutlichung das offene Magnetfeld, welches einem Zylinder ähnelt, vor und biegt dieses so, dass die beiden Enden miteinander verschmelzen und somit ineinander übergehen. Ein normales toroidales Magnetfeld reicht allerdings nicht aus, da die Teilchen einem axialem Drift unterliegen, welcher hier nicht weiter erläutert wird, da er die Grenzen, welche dieser Arbeit gesetzt wurden bei weitem übersteigen würde. Der Einfachheit halber ist es mit einem Rennwagen vergleichbar, welcher bei zu hoher Geschwindigkeit aus der Bahn fliegt. Diese Bahn ist jedoch nicht zweidimensional, sondern dreidimensional. Für dieses Problem wurden zwei Lösungen gefunden (siehe 4.). Zudem wird es durch Energieverluste weiterhin erschwert die Bedingungen zu erreichen. Diese Energieverluste entstammen hauptsächlich folgenden Ursachen:

- Coulombstöße bei noch unzureichenden Bedingungen: Wenn es innerhalb des Plasmas zu einem Zusammenstoß der Teilchen kommt, ohne dass die gegebenen Umstände bereits eine Fusion ermöglichen, kommt es zu einem Coulombstoß, welcher stark genug sein kann, dass die betroffenen Teilchen außerhalb des Magnetfeldes geschleudert werden²⁹.
- Im Plasma enthaltene Verunreinigungen können zur Abgabe ultravioletter Strahlung führen und so das Plasma kühlen.

4. Fusionsreaktoren

²⁹ Strauss, Karl: Kraftwerkstechnik, zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativen Energiequellen. Dortmund: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016⁷, S. 458

Es gibt viele Experimente und Forschungen, die sich darauf beziehen Kernfusion in naher oder auch ferner Zukunft als Energiequelle nutzbar zu machen. Aufgrund des Rahmens, der dieser Arbeit gesetzt wurde, wird im Folgenden lediglich auf das Prinzip der toroidialen Generatoren eingegangen sowie der individuellen Lösungsansätze bezüglich des axialen Drifts.

Als Verständnishilfe des folgenden Teils dient Abbildung 6. Alle Systeme, welche zu den toroidialen Generatoren gehören, bestehen aus einem torusförmigem Reaktorkern, dessen Innenwände hitzeresistent sein müssen, da sie sonst der vom Plasma abgestrahlten Hitze nicht widerstehen könnten und sich die, Magnetfeld erzeugenden, Spulen sonst erhitzen würden.

Die Spulen, die das Magnetfeld erzeugen, müssen auf supraleitende Umstände runtergekühlt werden. Andernfalls würde jeder, noch so geringe Widerstand in den Spulen die Kosten für die Erzeugung des Magnetfeldes in unermessliche Höhen treiben. Aufgrund dessen, dass es innerhalb des Plasmas mehrere Millionen Grad heiß ist, die Spulen sich aber in unmittelbarer Nähe des Plasmas befinden müssen, müssen die Innenwände des Reaktorkerns als nahezu idealer Isolator dienen.

Um diesen Reaktorkern herum befindet sich das Blanket, es dient zur Abbremsung der Neutronen sowie zur Herstellung von Tritium (siehe 5.4). Beim Passieren des Blankets verlieren die Neutronen ihre kinetische Energie, da sie in Wärmeenergie umgewandelt wird und das Kühlmittel erhitzt, welches durch das Blankett fließt. Der Kühlmittelkreislauf bringt das erhitzte Kühlmittel in einem weiteren Abteil des Generators, dort erzeugt es Dampf und fließt abgekühlt und energiearm wieder zurück in das Blankett, wo sich der Kreislauf wiederholt. Der heiße Dampf dient zum Betreiben riesiger Turbinen, welche die thermische Energie in elektrischen Strom umwandeln.

Um das im Generator vorhandene Plasma zu erhitzen, gibt es diverse Möglichkeiten. Der Tokamak verwendet zum Start eine elektrische Induktion, auch Ohmsche Heizung genannt³⁰. Es ist leicht mit einem Glühbirnendraht zu vergleichen, welcher sich, aufgrund seines Widerstandes, beim Durchfließen von elektrischem Strom erhitzt. Mit dem Plasma verhält es sich nicht anders, jedoch nimmt der Widerstand,

³⁰ So schreibt das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, in: <https://www.ipp.mpg.de/11741/plasmaheizung>, 16.03.20

sowie die Temperaturzunahme, mit zunehmender Temperatur ab. Die Höchsttemperaturen von ohmsch geheizten Plasmen liegt bei ca. 2-3keV. Aufgrund dessen, dass thermonukleare Fusionen eine Mindesttemperatur von 10keV benötigen, muss dem vorgeheizten Plasma weiterhin Energie zugeführt werden. Derzeitig werden folgende drei Möglichkeiten zum generellen Erhitzen vom Stellerator und weiteren Erhitzen vom Tokamak verwendet:

1. Neutralteilcheninjektion: Hierbei werden Teilchen mithilfe von Magnetischen Feldern beschleunigt und mit extremer Geschwindigkeit auf das Plasma geschossen. Die Teilchen übertragen bei einem Zusammenprall mit, den im Plasma vorhanden, Ionen ihre Energie und erhitzen somit das Plasma. Als Teilchen bieten sich besonders Deuteronen und Tritonen da sie das Plasma nicht verunreinigen und zusätzlich als Brennstoff dienen.³¹
2. Hochfrequenzheizung: Einstrahlung elektromagnetischer Wellen erhitzt das Plasma aus dem Grund, dass die Teilchen Energie aus dem Feld der Welle nehmen. Diese Energie wird dann wie bei der Neutralteilcheninjektion durch Stöße unter den Teilchen verteilt.³²
3. Magnetische Kompression: Würde man, den Käfig um das Plasma enger machen, hätte es immer noch dieselbe Energie und Masse auf kleinerem Raum, wodurch es zu einer Erhöhung der Temperatur sowie Dichte kommen würde. Dieses Verfahren hat jedoch den Nachteil, dass das Plasma durch die Kompression an Stabilität verliert und die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenbruchs steigt. Je stärker das Plasma komprimiert wird, desto höher ist diese Wahrscheinlichkeit.

4.1 Das Tokamak-Konzept

Der Tokamak löst das Problem, welcher der axiale Drift mit sich bringt, durch ein im Plasma fließenden elektrischen Strom. Der Strom fließt dabei, durch das Plasma selbst, ebenfalls in einer Kreisbewegung. Durch den toroidal fließenden Strom entsteht somit ein poloidales Feld, welches eine helikale Verdrillung bewirkt (siehe Abb. 7). Allerdings schließen sich die Feldlinien nach einer Runde nicht, sondern bilden konzentrische Schichten. Der im Plasma fließende Strom sorgt jedoch für Instabilität innerhalb des Plasmas. Außerdem hat der Tokamak den entscheidenden Nachteil, dass er nicht permanent betrieben werden kann, da sonst der im Plasma

³¹ Ebenda

³² Ebenda

fließende Strom unbegrenzt wachsen würde, das Plasma zusammenbrechen würde und große Mengen an Energie verloren gehen würden.

4.2 Der Stellarator

Bei einem Stellarator existiert kein im Plasma fließender Strom und somit auch kein poloidales Magnetfeld. Die Verdrillung wird hierbei nicht durch den Einsatz weiterer Magnetfelder hervorgerufen, sondern durch die Verdrillung des Toruses selbst. Da kein elektrischer Strom innerhalb des Plasmas fließen muss, kann ein Stellarator sich theoretisch in permanentem Betrieb befinden. Auf der anderen Seite ist die Berechnung sowie Erzeugung eines verdrillten Magnetfeldes um einiges komplexer. Grundsätzlich kann man einen Stellarator, anders als einen Tokamak, nicht als rotationssymmetrisch sehen. Er besteht dagegen aus sich wiederholenden Teilabschnitten (siehe Abb. 8).

5. Wirtschaftliche und Politische Aspekte der Kernfusion

Im folgenden letzten Kapitel wird dargelegt, inwieweit sich ein Fusionskraftwerk auf das bereits existierende System auswirken würde.

5.1 Sicherheit

Ein Fusionsreaktor ist nicht wie ein Kernkraftwerk, welches katastrophal schmelzen könnte. Selbst wenn es zu einem totalen Ausfall aller Systeme kommt, würde sich das Plasma lediglich ausdehnen und sofort abkühlen. Einfach gesagt es ist keine Bombe³³.

Die Freisetzung von dem radioaktiven Brennstoff Tritium wäre durchaus eine Gefahr für die Umwelt. Er könnte mit Sauerstoff reagieren, woraus giftiges radioaktives Wasser entstehen würde³⁴. Jedoch ist zu beachten das die Mengen an Tritium, welche gleichzeitig in Gebrauch sind, so gering sind, dass es sofort neutralisiert werden könnte.

Da Fusionsbomben, auch Wasserstoffbomben genannt, bereits existieren, muss man sich keine Sorgen machen, dass die weitere Erforschung der Kernfusion nur dazu dient neue Waffen zu ermöglichen. Ein Fusionsreaktor hätte jedoch das Po-

³³ Wesselbaum, Dennis: Kernfusion: Die vernachlässigte Alternative. Kiel: Institut für Weltwirtschaft 2011¹, S. 4

³⁴ Tosti, Silvano; Ghirelli Nicholas: Tritium in Tokamak devices: Technological issues.

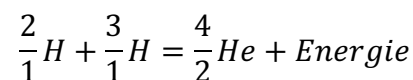
tenzial kernwaffenfähiges Material zu liefern. Dies wäre bereits mit leichten Änderungen zu erreichen und jedes Land, welches Zugriff auf einen solchen Generator hätte, wäre in der Lage ihre Anzahl an Kernwaffen mit Leichtigkeit zu erhöhen³⁵. Die Teams der Forscher bestehen jedoch aus Forschern aus der gesamten Welt, was den Missbrauch eines solchen Generators für solche Zwecke jedoch äußerst unwahrscheinlich macht.

5.2 Weitere Kosten

Selbst wenn Sterne wie unsere Sonne durch die Kernfusion eine riesige Menge Energie ausstrahlen und auch die Fusionsforschung immense Fortschritte aufweist, ist es nicht hundertprozentig sicher, dass die kontrollierte Kernfusion auf der Erde überhaupt als Energiequelle genutzt werden kann. Sonnen ermöglichen die Kernfusion durch ihre immense Anziehungskraft. Da wir jedoch nicht über diese Technologie verfügen und auch nicht wissen, ob es möglich ist solche Kräfte künstlich zu erzeugen, kann es sein, dass es unmöglich ist, eine positive Energiebilanz zu erreichen.

5.3 Potenzial der durch Kernfusion freigesetzten Energie

Das Potenzial der Kernfusion als Energiequelle scheint schier unendlich groß, zur Veranschaulichung sind im Folgenden die Energiewerte für eine Brennstoffmasse von etwas mehr als 5kg. Der Brennstoff besteht hierbei aus 50% Tritium sowie 50% Deuterium.



Geht man von einem 2mol Brennstoff aus. Also 1mol Tritium, umgerechnet etwa 3,016kg und 1mol Deuterium, etwa 2,014kg reagieren zu 1mol Helium mit einer Masse von ca. 4,002kg. Die Massendifferenz Δm entspricht somit der freigewordenen Energie bzw. der für uns gewonnene Energie.

Zur Berechnung von Δm

$$m_T + m_D - m_{He} = \Delta m = 3,01kg + 2,01kg - 4,002kg = 1,07kg$$

³⁵ Franceschini, Giorgio; Englert, Matthias: Safeguarding Fusion Reactors, Plädoyer für eine proliferationsresistente Gestaltung der Kernfusion. Frankfurt Am Main: Hessische Stiftung Friedens- und Konfliktforschung 2013¹, S. 4

Da es unser Ziel ist die gewonnene Energie pro Kilogramm zu errechnen, teilen wir die Masse, welche umgewandelt wurde pro Kilogramm auf.

$$\frac{\Delta m}{m_D + m_T} = \frac{1,07kg}{3,01kg + 2,01kg} = 0,204kg$$

Die Abhängigkeit der Energie von der Masse, wird mithilfe von Einsteins Formel

$$E = m * c^2 = 0,204kg * (\sim 2,9979 * 10^8)^2 m * s^{-1} = 1,8359 * 10^{18} kJ$$

Umgerechnet in kWh ergibt das ca. 5099777911kWh. Bei einem Jahresbedarf von etwa $1,4 * 10^{14}$ kWh/a ist es möglich mit einem Kilogramm Brennstoff die Erde für mehr als anderthalb Minuten mit Energie zu versorgen.

5.4 Brennstoffmaterial

Bislang beziehen sich die Forschungen hauptsächlich auf eine Fusion zwischen Deuterium und Tritium. An genug Deuterium zu gelangen ist, da es sich hier um ein stabiles Wasserstoff Isotop handelt und somit ausreichend in normalem Meerwasser vorhanden ist, keine große Herausforderung.

Tritium aber ist äußerst selten auf der Erde. Mithilfe von weiteren Fusionsprozessen im Reaktor wäre es allerdings möglich Tritium herzustellen. Lithium, welches in das Blanket eingebaut werden würde, würde mit dem zuvor freigewordenen Neutron zu Helium und Tritium fusionieren³⁶. Da das Neutron keine positive Ladung aufweist, geschieht diese Fusion auch unter normalen Bedingungen und es nicht nötig für diese Reaktion einen weiteren Generator zu bauen.

6. Fazit

Der Energiekonsum der Menschheit wächst stetig und dadurch auch das dabei entstandene Ausmaß der Umweltverschmutzung. Es ist somit essenziell, dass neue und bessere Energiequellen die Welt erobern. Nach Darlegung, der in dieser Facharbeit enthaltenen Fakten lässt sich die Frage, ob die Erforschung der Kernfusion weitere Ressourcen beanspruchen sollte, generell mit einem Ja beantworten. Grund dafür ist der Nutzen, welcher die Fusionsforschung mit sich bringen würde.

³⁶ Wesselbaum, Dennis: Kernfusion: Die vernachlässigte Alternative. Kiel: Institut für Weltwirtschaft 2011¹, S. 4

Ein intakter Fusionsreaktor bietet elementare Vorteile anderen Energiequellen gegenüber. Im Gegensatz zu den Fossilen Brennstoffen setzt er keine umweltschädigenden Substanzen frei. Ist anders als ein Kernspaltungsreaktor katastrophensicher, frei von Strahlung und hat ein nahezu endloses Vorkommen an Brennstoff. Wirtschaftlich ist er um einiges besser geeignet als die bislang eingesetzten regenerierbaren Energien da er nicht von externen Faktoren wie dem Wind oder der Sonne abhängig ist. Zugegebenermaßen wird es, bis zum Bau eines vollkommenen Fusionsreaktors, noch einiges an Zeit sowie Ressourcen kosten. Angesichts des unberechenbaren Tempos mit der die Fusionsforschung voranschreitet, lässt es sich zudem kaum vorhersagen, wann es so weit ist³⁷.

Auch wenn es Anfangs bloß als stationierter Generator umsetzbar sein mag, ist es nicht völlig auszuschließen, dass selbst Transportmittel, insbesondere die großen wie U-Boote oder Raumschiffe, durch Kernfusion betrieben werden könnten. Der Transport von Treibstoff ist vor allem bei fliegenden Fahrzeugen ein allgegenwärtiges Problem, da dieser in der Norm äußerst schwer ist. Ein Fusionsreaktor würde dieses Problem komplett beheben. Wasser ist nicht nur um einiges leichter als AvGas oder Kerosin, es würde sogar sehr viel weniger Brennstoff benötigen.

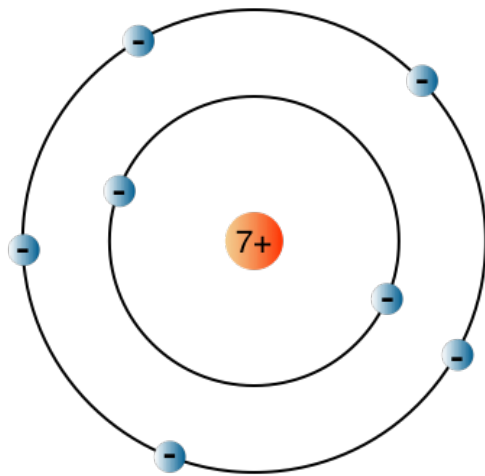
Letztendlich führen die Erfolge, welche die Fusion in den letzten Jahrzehnten zu verzeichnen hat, sowie die fehlenden Alternativen zu dem Schluss, dass die Menschheit es sich nicht leisten kann, die Kernfusion nicht weiter zu erforschen.

³⁷ Ebenda, S. 7 f.

7. Anhang

Abb. 1

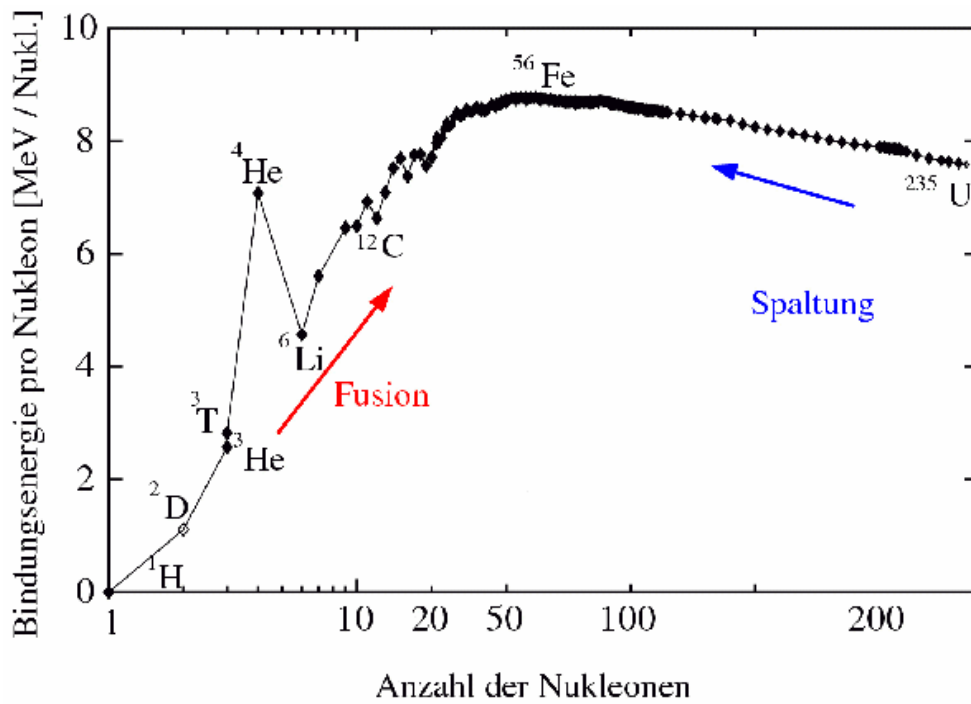
Bohrsche Atommodell



Quelle: <https://physikunterricht-online.de/wp-content/uploads/2018/03/Bohrsches-Atommodell.png>, 16.03.2020

Abb. 2

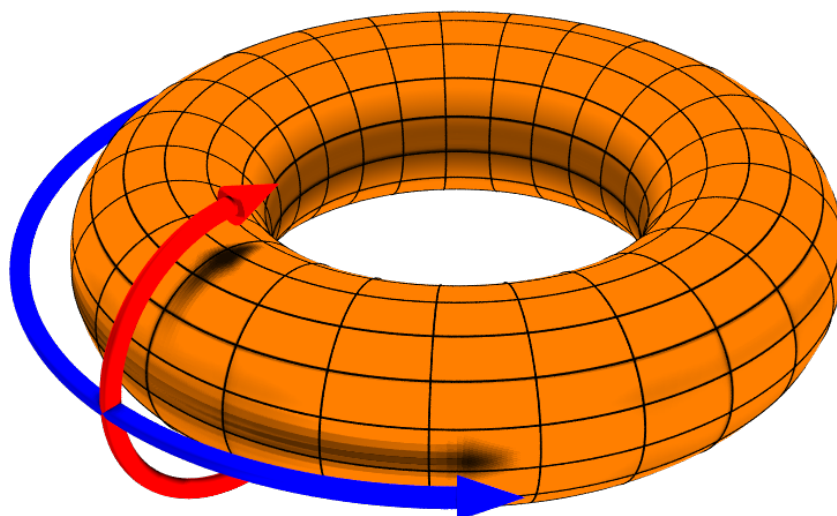
Tabelle der Bindungsenergie pro Nukleon einzelner Elemente und ihrer Isotope



Quelle: http://www.dieter-heidorn.de/Physik/SS/K10_Relativitaet/SRT_Einfuehrung/K06_Anwendungen/K06_Anwendungen_html_m32a528ca.gif, 16.03.2020

Abb. 3

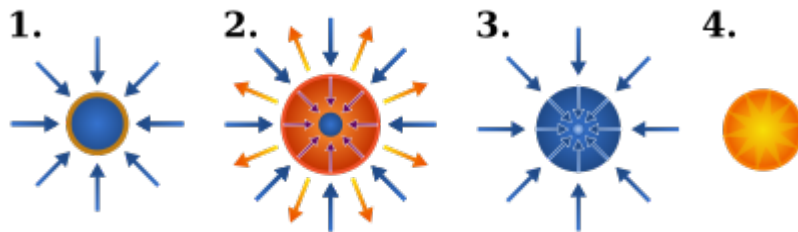
Torus



Quelle: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/db/Toroidal_coord.png, 16.03.2020

Abb. 4

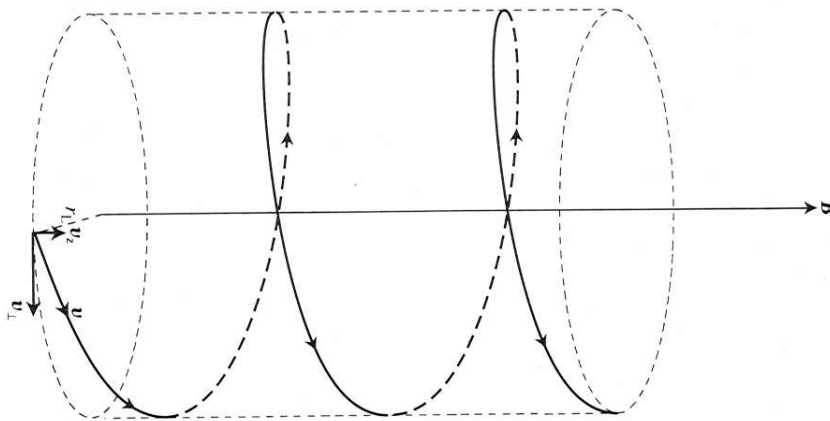
Reaktionsablauf innerhalb eines Pellets



Quelle: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/17/Inertial_confinement_fusion.svg/400px-Inertial_confinement_fusion.svg.png, 16.03.2020

Abb. 5

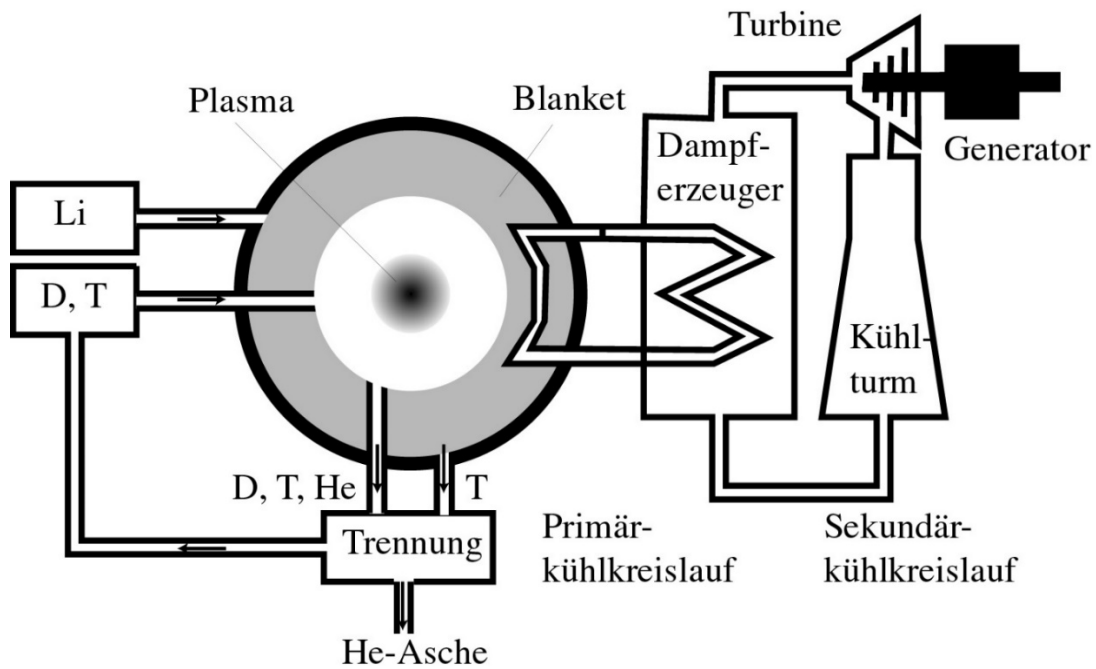
Gyrationsbewegung eines Teilchens um eine Magnetfeldlinie.



Quelle: https://www.researchgate.net/profile/Marcel_Goossens/publication/252698377/figure/fig9/AS:668975675502603@1536507638417/Helical-path-of-an-electron-in-a-uniform-magnetic-field.ppm, 16.03.2020

Abb. 6

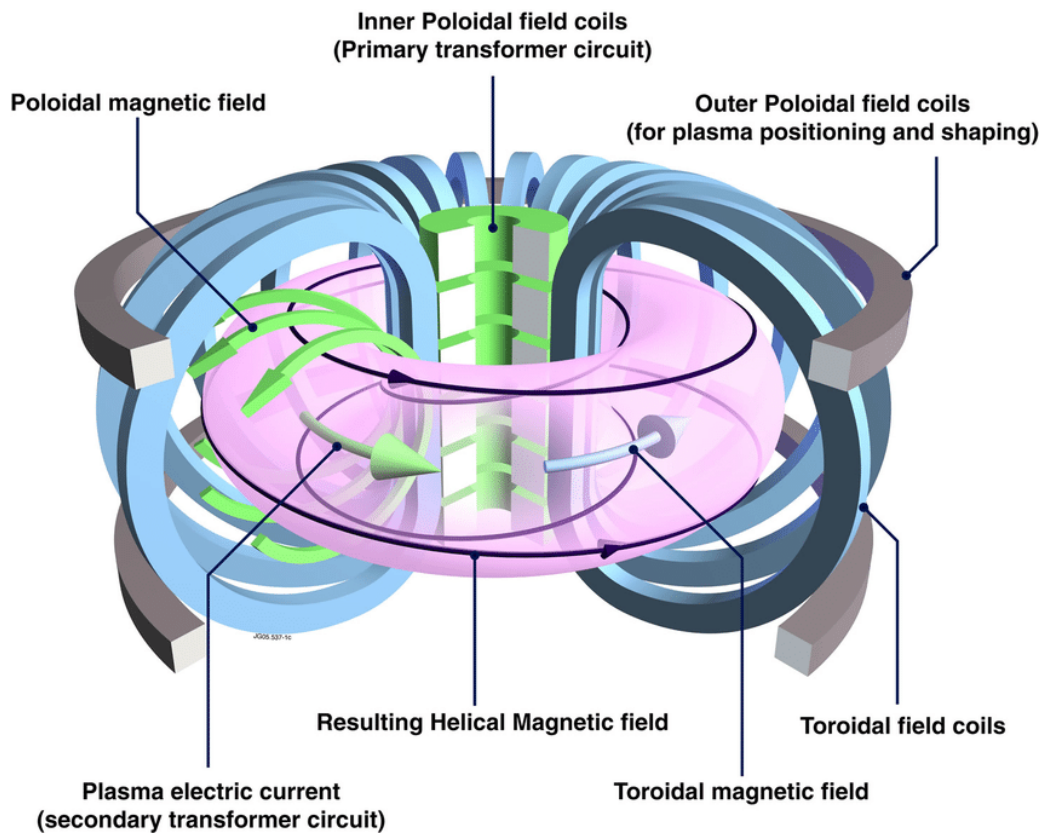
Schema eines auf magnetischem Einschluss basierenden Fusionsreaktors



Quelle: <https://www.dpg-physik.de/vereinigungen/fachlich/samop/fvp/weiterfuehrende-informationen/fusionsorientierte-plasmen-1>, 16.03.2020

Abb. 7

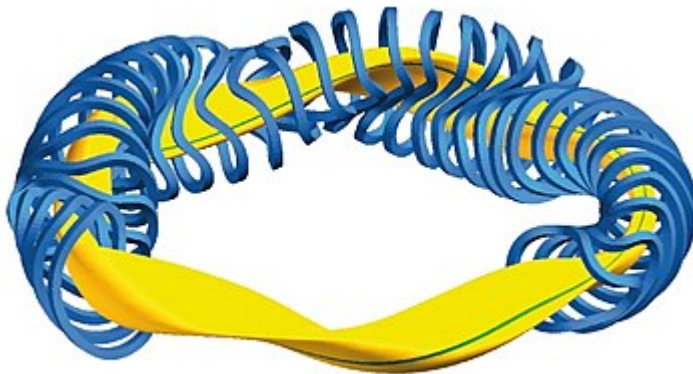
Skizzierung eines Tokamaks



Quelle: https://www.researchgate.net/figure/Sketch-of-the-tokamak-device-The-toroidal-magnetic-field-is-produced-by-external_fig1_259571717, 16.03.2020

Abb. 8

Aufbau eines Stellarators



Quelle: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b3/W7X-Spulen_Plasma_blaue_gelb.jpg/360px-W7X-Spulen_Plasma_blaue_gelb.jpg, 16.03.2020

8. Literaturverzeichnis

Bücher:

- Spatschek, Karl-Heinz: Theoretische Plasmaphysik: Eine Einführung. Stuttgart: Teubner Studienbücher 1990
- Stroth, Ulrich. Plasmaphysik: Phänomene, Grundlagen, Anwendungen. Heidelberg: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011
- Baker, Joanne: 50 Schlüsselideen Physik, Kernfusion. Spektrum Akademischer Verlag 2009¹
- Schuhmacher, Uwe: Kernfusion, Eine Einführung. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1993¹
- Strauss, Karl: Kraftwerkstechnik, zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativen Energiequellen. Dortmund: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016⁷
- Franceschini, Giorgio; Englert, Matthias: Safeguarding Fusion Reactors, Plädoyer für eine proliferationsresistente Gestaltung der Kernfusion.

Frankfurt Am Main: Hessische Stiftung Friedens- und Konfliktforschung
2013¹

Doktorarbeiten:

- Menglong, Zhao: Towards a More Complete Description of Tokamak Edge Plasmas: SOLPS Simulations with Kinetic Electron Effects. Technische Universität München, 2018
- Wesselbaum, Dennis: Kernfusion: Die vernachlässigte Alternative. Kiel: Institut für Weltwirtschaft 2011¹

Zeitungsschriftenartikel und Aufsätze:

- Altun, Atila: „Die Währung der Zukunft heißt Energie“, in: Der Tagesspiegel, 29.11.2007, <https://www.tagesspiegel.de/politik/erneuerbare-energien-die-waehrung-der-zukunft-heisst-energie/1108970.html>, 17.03.2020

Internetquellen:

- EUROfusion: <https://www.euro-fusion.org/de/fusion/geschichte-der-fusionsforschung/>, 16.03.2020
- comprehensive nuclear-test-ban treaty organization in: <https://www.ctbto.org/specials/testing-times/1-november-1952-ivy-mike>, 16.03.2020
- Scharf, Reiner: Das Farbenbeispiel der Protonenmasse. 26.11.2008. <https://www.faz.net/aktuell/wissen/physik-mehr/nukleonen-das-farben-spiel-der-protonenmasse-1728804.html>, 02.03.2020
- Schulz, Joachim: Joachims Quantenwelt. 17.10.2003: <http://www.quantenwelt.de/elementar/myonen.html>, 03.02.2020
- So schreibt das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, in: <https://www.ipp.mpg.de/11741/plasmaheizung>, 16.03.20

9. Einverständniserklärung

Erklärung zur selbstständigen Abfassung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken entnommen wurden, habe ich mit genauer Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Achim den 15.03.2020

Ort, Datum

T. Imort.

Unterschrift

Freiwillige Erklärung

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Achim den 15.03.2020

Ort, Datum

T. Imort.

Unterschrift