

Fusionsreaktoren und ihre Funktionsweise

Perspektiven für die zukünftige Energieversorgung

Potulski
Dominik

Gymnasium Am Markt
Achim
März, 2020

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	2
2.	Fusion - Technologie	4
2.1.	Was Passiert In Der Sonne	4
2.2.	Was Sind Fusionsreaktoren	5
2.2.1.	Treibstoff	6
2.2.2.	Aufbau	7
	Das Plasma	7
	Die Erste Wand	8
	Schaden Durch Atome	8
	Schaden Durch Neutronen	9
	Das Brutblanket	10
	Supraleitende Magnetische Spulen	11
2.3.	Energieverhältnis	11
3.	Privatunternehmen	13
3.1.	Ein Beispiel - Wie Sie Die Raumfahrt Verändern	13
3.2.	Warum Fusionsenergie Eine Zukunft Bieten Kann	14
3.3.	Vergleich Zu Anderen Strom Angeboten	15
	Fossiler Strom	15
	Erneuerbarer Strom	15
	Atomarer Strom	15
4.	Fazit	16
	Anhang	17
	Literaturverzeichnis	25

1. Einleitung

Gemeinsam mit dem stetigen Steigen unserer Bevölkerung, sowie eine stärker zunehmenden Urbanisation, steigt auch der Energieverbrauch um den Globus. Eines der größten Probleme unserer heutigen Zeit ist die Energie, genauer: Unser Strom. Schon allein im Sinne des Klimawandels ist es wichtig, unsere Energiequellen auf Erneuerbare umzustellen.

Mit einem Blick in den Himmel sieht man die Sonne. Sie scheint aus dem Nichts viel Energie zu produzieren. Können auch wir eine kleine Sonne für uns bauen, welche uns Strom für alle generiert, 'To bottle a star' ?

Neben den klassischen Methoden, wie Wind, Wasser, Sonnenlicht, ist die Fusionsenergie eine oft vernachlässigte Option. Der Treibstoff ist dabei aus bloßem Meerwasser entnehmbar.

Ein gewinnbringendes Konzept kann die jetzigen Stromgeneratoren stark entlasten, so dass die, die auf fossilen Brennstoffen basieren, in naher Zukunft, abgeschaltet werden können.

Fusion wird generell als 'Die Energiequelle' bezeichnet, welche die Menschheit bis in die Ewigkeit versorgen soll. Dies basiert auf der Formel der Äquivalenz von Masse und Energie $E = \Delta m * c^2$ ^{1,2,3}.

Mit dem Einstieg von privaten Unternehmen in die Fusions-Forschung ist nun auch geklärt, dass es sich wirtschaftlich lohnen kann, Forschung in die Technologie der Fusion zu investieren. Es ist keine Frage mehr, ob Fusion möglich ist, sondern wie wir sie effizient nutzen können. Private Unternehmen können eine schnellere Lösung bieten. Die Frage ist nur, ob sie es auch dieses Mal schaffen.

¹ Bei der Fusion wird Masse in Energie umgewandelt. $E \sim \Delta m$.

² Für Formelzeichen und Einheiten siehe: Anhang - Formelzeichen und Einheiten.

³ Für Chemische Stoffe siehe: Anhang - Chemische Stoffe.

Zum allgemeinen Verständnis wird zunächst in die grundlegenden Theorie eingewiesen, Fusion in der Sonne, woraufhin dann die Funktionsweise eines Fusionsreaktors erläutert wird. Dafür werden die vier wichtigsten Komponenten in Betracht gezogen und welche Probleme und Herausforderungen bei diesen vorhanden sind. Im zweiten Teil (3.) wird anhand eines Beispiels aus der Raumfahrt gezeigt, dass private Unternehmen die Wissenschaftliche Welt stark beeinflussen, sowie beschleunigen können, ohne viel Geld hinein investieren zu müssen. Daraufhin werden Vor- und Nachteile von Fusionsreaktoren besprochen und anschließend mit anderen Stromquellen verglichen.

Anhand dessen ist dann die Frage geklärt, wie Fusionsreaktoren funktionieren und ob Unternehmen unseren Strom bald per Fusionsenergie bereitstellen.

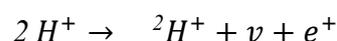
2. Fusion - Technologie

Mit diesem Kapitel wird die Grundidee der Fusion, die Sonne, erklärt. Anhand dessen wird gezeigt, wie dies hier auf der Erde möglich ist. Dabei stellt die Wissenschaft ein mathematisches Modell der Physik dar, welche im Folgenden erklärt wird. Dabei werden verschiedenen Problemen berücksichtigt welche verursacht werden und wie sie lösbar sind.

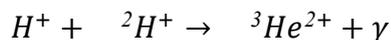
2.1. Was passiert in der Sonne?

Mit einer Temperatur von über $1,5 \cdot 10^7 \text{ K}$ ⁴ und aufgrund der hohen Gravitationskräfte, extrem hohen Druck, ist die Energie der Sonne größer, als die, welche Atomkerne und Elektronen zusammenhält. In einem so genannten Plasma liegen die Atome in ionisierter Form vor. Nuklei und Elektronen bewegen sich mit hoher Geschwindigkeit frei durch den Raum. Dort fusionieren Nuklei miteinander, da sie die Coulombkraft zwischen ihnen überwinden und bilden somit höhere Elemente. Je geringer die Ordnungszahl und somit die Anzahl an Protonen die das Element hat, desto geringer ist die Coulombkraft, welche überwunden werden muss. Dies geschieht nach der sogenannten 'Proton-Proton-Kette', welche drei Schritte umfasst^{5,6}:

1. Zwei Protonen stoßen aneinander und es entsteht Deuterium, sowie ein Neutrino⁷ und ein Positron⁸.



2. Ein Proton stößt mit dem Deuterium zusammen, wobei ein Helium-3 Nukleus und Gammastrahlung entsteht.



⁴ Sharp, Tim: How Hot Is the Sun? [online] 19.08.2017, <https://www.space.com/17137-how-hot-is-the-sun.html>, 05.01.2020.

⁵ NASA: The Solar Interior [online], o.J.. <https://solarscience.msfc.nasa.gov/interior.shtml>, 05.01.2020.

⁶ Chemische Stoffe: Siehe: Anhang - Chemische Stoffe.

⁷ Neutrino: Elektrisch neutrales Elementarteilchen von geringer Masse.

⁸ Positron: Positiv geladenes Elektron (Anti-Elektron). Bei Zusammenstoß mit einem Elektron gleichen sich beide gegenseitig aus werden zu 100% Energie umgewandelt nach der Äquivalenz der Masse und Energie.

3. Zwei Helium-3 Nuklei stoßen aneinander und formen ein natürliches Helium-Atom (He^{2+}), sowie zwei Protonen.



Es gibt noch weitere Ketten, welche in der Sonne allerdings seltener stattfinden. Die Energie, die dabei freigelassen wird, ist in Form von kinetischer Energie im freigelassenen Neutrino und der zwei Protonen, sowie in der Gammastrahlung enthalten. Sie ist zu erklären durch den Massendefekt, welcher besagt, dass die Energie eines Nukleus geringer ist, als der Summe der enthaltenen Energie von Protonen und Neutronen⁹. Die Gammastrahlung ist daher durch die Umwandlung von Masse zu Energie, nach $E = mc^2$, entstanden.

2.2. Was sind Fusionsreaktoren? - A sun in a jar

Im Grunde sind Fusionsreaktoren kleine gefangene Sonnen, welche von uns Menschen gemacht sind - 'a sun in a jar'. Da wir allerdings keinen solchen Druck aufbauen können wie der im Kern der Sonne durch die Gravitation verursachte Druck, müssen wir extrem hohe Temperaturen herstellen, damit Fusion hier auf der Erde möglich wird.

In dem Reaktorraum befindet sich das Plasma innerhalb einer Torusform¹⁰. Dieses Plasma wird von Magnetfeldern gehalten.

Fusionsreaktoren lassen sich in verschiedene Kategorien einteilen abhängig von der Haltung und der Lebensdauer des Plasmas¹¹. Die in dieser Arbeit beschriebene Technologie lässt sich nur auf Reaktoren mit "Magnetic confinement" in der "Torus"-Konfiguration anwenden. Ausgeschlossen hiervon ist außerdem der "Torus pinch". Zwar lässt sich das Meiste auch an ihn anwenden, jedoch verhält sich das Plasma anders, da es Pulsierend ist.

⁹ Hagler, M. O.; Kristiansen M.: An Introduction to Controlled Thermonuclear Fusion. Kanada: Lexington Books, 1977.

¹⁰ Torusform: Donutform.

¹¹ Siehe: Anhang - Bildmaterial - M-2-3.

2.2.1. Treibstoff

Der einfachste Treibstoff für die Fusion ist Deuterium. Die Reaktion findet, ähnlich wie die in der Sonne, aber ohne den ersten Schritt der Proton-Proton-Kette statt. Andere mögliche Treibstoffe sind Tritium oder Helium-3. Allgemein ist zu sagen, dass Elemente mit niedrigen Ordnungszahlen besser für die Fusion geeignet sind, da sie geringere Energieverluste durch Strahlung erzeugen, sowie auch geringeren Schaden an dem Fusionsreaktor ausrichten und die nötige Energie, welche zum Überwinden der Coulombkraft notwendig ist, geringer ist¹².

Auf der Erde befindet sich unter 6500 Wasserstoff-Atomen ein Deuterium-Atom. In Meereswasser ist Deuterium häufig auffindbar¹³, dies macht es einfach den Treibstoff zu bekommen. Tritium hingegen ist in der Natur nicht in nennenswerten Mengen vertreten, da es radioaktiv ist, mit einer Halbwertszeit von 12,4 Jahren¹⁴ und Helium-3 ist zwar auf der Erde nur gering auffindbar, kann aber von der Oberfläche des Mondes gewonnen werden¹⁵.

Mit einem Liter Deuterium kann die gleiche Energie freigesetzt werden wie mit dem Verbrennen von 300 Litern Benzin¹⁶. Obwohl Deuterium sich als Treibstoff eignen würde, wird es nicht verwendet, da wesentlich stärkere magnetische Felder zum Halten der Treibstoffmischung notwendig sind, als der Mensch sie momentan bauen kann.

Innerhalb eines Reaktors wird versucht eine gezielte Fusionsreaktion hervorzurufen, damit der Reaktor entsprechend designt werden kann. Natürlich können aber auch andere Reaktionen stattfinden, da Fusionen nur zufällig auftreten und dabei auch nicht nur gewünschte Produkte entstehen. Auch Zwischenprodukte müssen weiter fusioniert werden, damit die Effizienz hoch ist. Allgemein sind alle Low-Z-Atome¹⁷ für die Fusion geeignet, da keine zusätzliche Energie notwendig ist, diese auf Temperatur zu bringen, weil dazukommende Atome nur einen geringen Teil des Plasmas ausmachen.

¹² Darauf wird in 2.2.2. eingegangen.

¹³ Hagler; Kristiansen: 1977, 6.

¹⁴ Ebenda, 6.

¹⁵ Siehe: Anhang - Erklärungen - Mining The Moon.

¹⁶ Hagler; Kristiansen: 1977, 6.

¹⁷ Low-Z-Atom: Atom mit niedriger Ordnungszahl.

In Fusionsreaktoren mit einer kontinuierlichen Fusionsreaktion¹⁸ wird der Treibstoff dem Plasma zugegeben durch ein Treibstoffgasgemisch. Dieses befindet sich mit dem Plasma im Reaktorraum. Da das Plasma nicht aus dem Zentrum des Magnetfeldes entweichen kann, aber das Gasgemisch, aufgrund dessen, dass es nicht ionisiert ist, in das Plasma hinein diffundieren kann, wird so die Reaktion ständig versorgt¹⁹. Zudem wird Tritium im Brutblanket des Fusionsreaktors hergestellt²⁰. Läuft die Fusionsreaktion nicht kontinuierlich statt, so kann das Treibstoffgas zwischen aktiven Zeiten in den Reaktionsraum eingelassen werden.

2.2.2. Aufbau

Ein Fusionsreaktor besteht aus vier fundamental wichtigen Systemen. Das Plasma, die erste Wand, das Brutblanket und die supraleitenden magnetischen Spulen. Diese werden in folgenden Unterkapiteln erklärt und dabei auftretende Problematik wird erläutert und wenn gegeben geklärt.

Das Plasma

Hier finden die Fusionsreaktionen statt. Das Plasma befindet sich im Zentrum des Reaktors innerhalb eines Vakuums. Dort muss es von magnetischen Feldern gehalten werden²¹, um es von den inneren Wänden des Reaktorraums fernzuhalten, da es sonst sofort seine Energie an die Wand abgibt und somit abkühlt.

Es wird bei dem Plasma zwischen 3 Typen unterschieden. (1) Das Plasma befindet sich über einen Zeitraum von Wochen bis Monaten oder idealerweise bis zum Ende der Betriebszeit des Reaktors in einer Fortwährenden Fusionsreaktion. Solche werden als "Steady" bezeichnet. (2) Das Plasma ist Pulsierend. Das heißt, dass die Zeit, in welcher Fusionsreaktionen ablaufen, begrenzt ist auf wenige Sekunden. Die aktive und inaktive Zeit ist ein periodischer Prozess in gleichen Intervallen. (3) Findet die Fusionsreaktion grundlegend fortwährend statt, wird aber in periodischen Zeitabständen gestoppt, wird das Plasma als "Quasi-Steady" bezeichnet.

¹⁸ 3 Typen der Fusionsreaktion: Siehe: Das Plasma.

¹⁹ Niu, Keishiro: nuclear fusion. Newcastle Upon Tyne: Athenæum Press, 1989. S. 175.

²⁰ Siehe: Das Brutblanket.

²¹ Siehe: Supraleitende magnetische Spulen.

Damit die Fusion fortwährend verlaufen kann, muss das Plasma konstantem Druck und Temperatur unterliegen. Aufgrund der laufenden Fusionsreaktionen, sowie Temperaturverluste durch Strahlung welche beim Beschleunigen von geladenen Teilchen entsteht^{22,23}, muss das System stetig mit neuem Treibstoff versorgt werden muss²⁴.

Die erste Wand

Die erste Wand, die dem Plasma zugewandt ist, muss den extremen Gegebenheiten der Fusionskammer standhalten. Dazu gehört zum einen die hohe Temperatur, aber auch austretende Ionen und Elektronen des Treibstoffes, sowie des Reaktionsprodukts, Neutronen, α -Teilchen, elektromagnetische Wellen, γ - und Röntgenstrahlung. Der größte Schaden wird von Atomen und Neutronen verursacht, zwischen ihnen wird unterschieden²⁵.

Die erste Wand - Schaden durch Atome

Bei den Atomen sind die zwei entscheidenden Arten der verursachten Zerstörung Sputtern²⁶ und Blasenbildung²⁷, wobei die Wahrscheinlichkeit, dass ein ausgetretenes Atom zur Blasenbildung beiträgt 100 Mal größer ist als zum Sputtern²⁸. Die Atome, die aus der Wand gerissen werden beim Sputtern, sowie der Blasenbildung fügen sich dem Plasma hinzu und sorgen für größere Strahlungsmengen die im Plasma entstehen. Wenn zum Beispiel zu einem reinen Wasserstoff-Plasma nur 1% Sauerstoff-Atome hinzugegeben wird, erhöht sich austretende Bremsstrahlung um 77% aufgrund der höheren Ordnungszahl des Sauerstoffs. Für eine Wand, welche aus Niob besteht und der Energieverlust geringer als 10%, ausgehend von der Bremsstrahlung, sein soll, muss das Verhältnis von Niob-Atomen zu Wasserstoff-Atomen geringer als $5,8 \cdot 10^{-5} \frac{n_{Nb}}{n_H}$ sein²⁹.

²² (1) Siehe: Anhang - Erklärungen - Bremsstrahlung.

²³ (2) Siehe: Anhang - Erklärungen - Synchrotronstrahlung.

²⁴ Niu, Keishiro: 1989. 174 f..

²⁵ Ebenda, 178 f..

²⁶ Siehe: Anhang - Erklärungen - Sputtern.

²⁷ Siehe: Anhang - Erklärungen - Blasenbildung.

²⁸ Niu, Keishiro: 1989. 179 f.f..

²⁹ Ebenda. 182 f.f..

Es muss also vermieden werden, dass austretende Atome nicht die erste Wand direkt treffen. Passiv agiert das Treibstoffgas, welches um das Plasma herum ist und nicht genug Energie besitzt um an der Fusionsreaktion teilzunehmen, diese Atome abzubremsen und ihre Energie zu nehmen. Aktiv kann man Geräte installieren, wie einen Limiter oder einen Divertor³⁰.

Der Limiter limitiert die Ausbreitung des Plasmas durch magnetische Felder, welche vor der Wand stark sind, und bremst somit Atome stark ab. Das Treibstoffgas ist davon nicht betroffen, da es nicht wie das Plasma ionisiert ist. Die abgebremsten Atome fügen sich dann dem Gas außerhalb des Plasmas hinzu und können zukünftige austretende Atome ebenfalls abfangen. Da Elektronen und Atomkerne gleichermaßen aus dem Plasma austreten entstehen Ionen im Gas³¹.

Der Divertor erweitert das Magnetfeld des Reaktorraums³² an der Seite des Torus. Mit ihm können austretende Atome aus dem Plasma und durch Sputtern, sowie Blasenbildung aufgefangen werden. Diese werden dann in Richtung einer sogenannten Divertortargetplatte gelenkt, welche die Atome auffängt³³. Aufgrund der kinetischen und thermischen Belastung wird diese Platte abgenutzt und muss regelmäßig erneuert werden.

Die erste Wand - Schaden durch Neutronen

Neutronen sind sehr gefährlich für Fusionsreaktoren, da sie durch alle Schichten durchdringen können und somit auch Schaden im tieferen System, sowie der Elektronik anrichten können.

Wenn ein Neutron mit hoher Geschwindigkeit sich auf ein Atom zubewegt, gibt es keine Coulombkraft die das Neutron bremst, da es keine Ladung besitzt. In einem Salz oder Metall kann dieses Atom aus seiner Gitterposition geschossen werden, wodurch im schlimmsten Fall der Stoff seine Stabilität oder Funktion verliert³⁴.

Wenn ein Neutron auf ein Atom trifft, kann auch eine von vielen Reaktionen ablaufen, wovon die beiden häufigsten hier gezeigt werden. Dabei ist A das Ausgangsatom, B_n das Endatom.

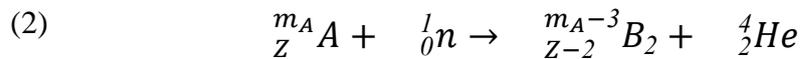
³⁰ Niu, Keishiro: 1989. 182 f.f..

³¹ Ebenda, 182 f.f..

³² Siehe: Anhang - Bildmaterial - M-2-1.

³³ Niu, Keishiro: 1989. 182 f.f..

³⁴ Ebenda, 185 f.f..



Daher, dass die Ordnungszahl verändert wird, entstehen neue Atome. Diese können auch radioaktiv sein, da meistens instabile Isotope als B_n entstehen, was ein großes Problem für die Elektronik bietet. Anders als Abfallstoffe eines Atomreaktors haben diese radioaktiven Atome keine Halbwertszeit von mehreren Millionen von Jahren. Zudem können die Produkte dieser Reaktion ebenfalls an der Fusion teilnehmen³⁵.

Das Brutblanket

Das Brutblanket ist eine Schicht, welche (1) austretende Neutronen, wie im letzten Kapitel beschrieben, die Kinetische Energie aufnimmt und umsetzt³⁶, (2) zur Tritiumherstellung im Fusionsreaktor notwendig ist und (3) die magnetischen Spulen vor Neutronen, sowie γ -Strahlung schützt³⁷.

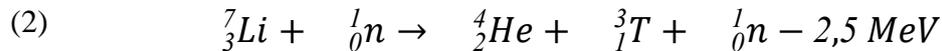
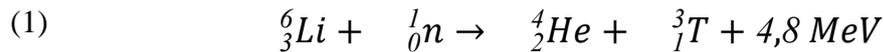
Zur Herstellung von Tritium im Fusionsreaktor besteht das Brutblanket aus Lithium und Lithium-Isotope. Lithium bietet den Vorteil, dass (1) es einerseits Eigenschaften eines Metalls besitzt, Lithium hat eine hohe Wärmekapazität und eine hohe Wärmeleitfähigkeit, weshalb abwärme von Lithium entnommen werden kann, aber auch (2) eine geringe Ordnungszahl hat, weswegen es beim Beschuss von Neutronen in potentielle Fusionsreaktionspartner zerfallen kann. Wenn die Neutronen nicht ausreichen für die Reaktion zur Herstellung von Tritium, wird das Lithium-Isotop 6_3L verwendet, da ein Neutron als Produkt wieder hervorgeht. Allerdings ist diese Reaktion (2), im Gegensatz zur ersten (1) Endotherm. Zusätzlich kann Beryllium in das Brutblanket integriert werden, da es beim Zusammenprall mit einem Neutron zwei Neutronen abgibt (3), welche folgend beide mit Lithium reagieren können³⁸.

³⁵ Niu, Keishiro: 1989.185 f.f..

³⁶ Hier kann die Energie von Außen aufgenommen werden. Die Stromproduktion geschieht Sieden von Wasser, welches turbinen antreibt.

³⁷ Niu, Keishiro: 1989. f.f..

³⁸ Ebenda, 187 f.f..



Supraleitende magnetische Spulen

Die Supraleitenden³⁹ magnetischen Spulen, angeordnet wie im Kreis stehende Helmholtzspulen⁴⁰, dienen dazu, das Plasma und die Wänden des Reaktorraums getrennt zu halten, um Abkühlungen des Plasmas zu vermeiden. Durch die kreisförmige Aufstellung der Spulen entsteht ein Ring aus magnetischen Feldern. Geladene Teilchen benötigen viel kinetische Energie, um aus dem magnetischen Feld auszubrechen⁴¹

Die Spulen müssen supraleitend sein, damit sie eine höhere Spannung und somit ein stärkeres Magnetfeld erzeugen können. Diese Spulen können eine Magnetfeldstärke bis zu 20T aufbauen. Sie sind außerhalb des Reaktorraums nach dem Brutblanket, Limiter und Divertor angebracht, sodass sie möglichst wenig Schaden durch Neutronen erleiden⁴², aber auch um sie vor der Hitze des Plasmas zu schützen, denn damit sie ihre Supraleitfähigkeit nicht verlieren müssen sie unter ihrer Sprungtemperatur bleiben⁴³.

2.4. Energieverhältnis

Das Verhältnis der zur Fusions hinzugefügten Energie zur Energie, welche aus der Fusionsreaktion freigelassen wird, wird durch Q ausgedrückt.

$$Q = \frac{P_f}{P_h}$$

³⁹ Siehe: Anhang - Erklärungen - Supraleiter.

⁴⁰ Siehe: Anhang - Bildmaterial - M-2-2.

⁴¹ Wie besprochen in: Die erste Wand.

⁴² Niu, Keishiro: 1989. 191.

⁴³ Ebenda, 195.

Je höher die freigelassene Energie und/oder je niedriger die hinzugefügte Energie, desto höher das Verhältnis. Ein größeres Verhältnis ist deshalb zu erstreben, da es eine größere Energie-Effizienz für den Reaktor bedeutet⁴⁴.

Die dem Fusionsreaktor hinzu gegebene Energie addiert sich aus den notwendigen Strom, welcher benötigt wird um die magnetischen Spulen unter ausreichender Spannung stehen zu haben, aber auch aus der Energie, welche notwendig ist um das Plasma und das Treibstoffgas auf Mindesttemperatur zu erhitzen. Diese Energie kann nicht nur aus verbrauchten Strom berechnet werden, sondern muss auch der Energie abgezogen werden, mit welcher das Plasma das umliegende Treibstoffgasgemisch aufwärmt⁴⁵.

⁴⁴ Niu, Keishiro: 1989. 175.

⁴⁵ Ebenda, 175.

3. Privatunternehmen

In diesem Kapitel wird gezeigt, wie Private Unternehmen einen Einfluss auf die Wissenschaft der Fusionsreaktoren haben.

Mit Experimentalreaktoren Reaktoren der Wissenschaft sind solche gemeint, die von Universitäten administriert werden. Diese eignen sich nicht für eine Stromproduktion für die Öffentlichkeit, da sie zu teuer und viel zu groß sind. Ihre Aufgabe ist es ein mathematisches Modell der Physik zu repräsentieren und Eigenschaften von verschiedenen Stoffen, zum Beispiel für das Brutblanket, herauszufinden. Sie betreiben die Grundlagenforschung der Fusionstechnologie.

Viele der Unternehmen, welche Fusionsreaktoren bauen, haben sich von Universitären Forschungsgruppen abgespalten, mit der Hoffnung die Bevölkerung mit Strom zu versorgen und daraus einen Finanziellen Gewinn zu erzielen⁴⁶.

3.1. Ein Beispiel - Wie Sie Die Raumfahrt Verändern -

Sie hatten einen großen Einfluss auf die Raumfahrt, nun verändern sie die Wissenschaft der Fusionsreaktoren

Ihre Herangehensweise ist grundlegend anders, als die von Forschungs Bündnissen, wie bei ITER⁴⁷. Während ITER auf theoretische Konzepte und Wissen von vorherigen Reaktoren basiert, fokussieren sich Privatunternehmen auf ein Design, welches sie denken, dass ihr Problem am erfolgreichsten lösen wird. Durch das “try and error” verfahren sammeln sie schnellstmöglich Daten und können diese im nächsten Start nutzen.

Bereits in der Raumfahrt zeigen Unternehmen, wie SpaceX, Blue Origin oder Rocket Lab, einen schnellen Fortschritt, soweit, dass sie schon innerhalb der kommende Jahre Menschen ins All bringen können⁴⁸. Auch sie nutzen die Daten aus jedem Start, um Effizienz und Erfolg zu erreichen.

⁴⁶ Bourzac, Kather: Fusion start-ups hope to revolutionize energy in the coming decades [online], 06.08.2018. <https://cen.acs.org/energy/nuclear-power/Fusion-start-ups-hope-revolutionize/96/i32>, 22.02.2020.

⁴⁷ ITER: ITER Homepage [online], o.J. <https://www.iter.org/>, 22.02.2020.

⁴⁸ Rocket Lab ist davon ausgeschlossen. SpaceX mit “Crew Dragon”, Blue Origin mit “New Shepard”.

Mit dem Ziel Geld zu sparen, tragen sie sogar etwas zur Umwelt bei, da es auch Ihr Ziel ist die verwendeten Raketen wiederzuverwenden indem sie die Raketen wieder landen lassen. SpaceX plant die selbe erste Stufe der "Falcon 9" Rakete bis zu 100 Mal starten zu können. Dies verringert die Kosten pro Start drastisch, da Aufarbeitungen nur ca. alle 10 Starts von Nöten sind⁴⁹.

3.1. Warum Fusionsenergie eine Zukunft bieten kann

Besonders in der nahen Zukunft müssen wir auf unsere Stromquellen achten. Sie sollten möglichst emissionsfrei sein. Fusionsreaktoren stoßen im Betrieb kein Kohlenstoffdioxid aus, keine giftigen Stickoxide und auch keine anderen Treibhausgase. Als Endprodukt entsteht Helium, nicht in großen Mengen, kann aber verkauft werden.

Es entsteht auch kein langlebiger Radioaktiver Abfall. Zwar zerfallen Atome durch Neutronen welche auch radioaktiv sein können, diese können aber wieder in die Fusion eintreten⁵⁰.

Ein Fusionsreaktor kann nicht außer Kontrolle geraten wobei er großen Schaden anrichtet. Zwar kann er außer Kontrolle geraten, aber die Fusionsreaktion ist kein Kettenreaktion. Damit das Plasma in seiner Form bleibt und die Reaktionen stattfinden können, müssen alle extremen Bedingungen stimmen. Ein solcher Reaktor würde also einfach aufhören zu funktionieren ohne eine Gefahr darzustellen⁵¹. Bis die Anlage mit dem Reaktor nicht zerstört wird, kann auch kein Radioaktives Tritium in die Umwelt gelangen.

Da der einfachste Treibstoff für Fusionsreaktoren Deuterium ist, kann der Treibstoff für lange Zeit gefördert werden. Natürlich ist auch der Treibstoff für Fusionsreaktoren endlich, ist aber erst nach längerer Zeit aufgebraucht.

Aufgrund der konstanten Wärmeabgabe des Plasmas können Fusionsreaktoren das Stromnetz verlässlich mit Strom versorgen. Sie funktionieren zu jeder Jahres- und Tageszeit.

⁴⁹ Clark, Stephen: Musk previews busy year ahead for SpaceX [online], 04.04.2017.
<https://spaceflightnow.com/2017/04/04/musk-previews-busy-year-ahead-for-spacex>,
09.02.2020.

⁵⁰ Siehe: Schaden durch Neutronen.

⁵¹ ITER: ITER Homepage [online], o.J. <https://www.iter.org/>, 22.02.2020.

Das größte Problem sind jedoch die Kosten welche mit dem Bau eines Fusionsreaktors einhergehen. Der Experimentalreaktor ITER zum Beispiel kostet 13 Millionen Euro. Dafür sind die Kosten für den notwendigen Treibstoff gering, da nicht viel verwendet werden muss und dieser Kostengünstig gewonnen werden kann⁵².

3.3. Vergleich zu anderen Strom Angeboten

Private Fusions-Unternehmen benötigen bereits viel Geld um die Reaktoren zu entwerfen und zu Bauen. Einen Markt für Fusions-Strom zu etablieren und den Strom dann Marktfähig anzubieten, benötigt eine große wirtschaftliche Leistung und starke Wettbewerbsfähigkeit gegen andere Arten der Stromproduktion..

Fossiler Strom

Ökologisch gesehen ist es schon ausreichend, wenn Fusionsreaktoren den Strom der Verbrennanlagen für fossilen Strom ersetzen. Zusätzlich sind fossile Energiequellen endlich und somit keine Lösung, welche die Menschheit nachhaltig versorgen kann.

Erneuerbarer Strom

Der große Vorteil an erneuerbaren Energiequellen ist, dass sie bei der Produktion des Stroms keine Abfallstoffe produzieren und keinen Treibstoff verbrauchen, sie nehmen die im Sonnenlicht, Wind und Wasser enthaltene Energie auf und wandeln diese in für uns nutzbaren Strom um. Jedoch sind diese nicht verlässlich und versorgen das Stromnetz nur schwankend, weil nicht immer gleich viel Wind weht oder eine Photovoltaikanlage nicht zu 100% von der Sonne bestrahlt werden. Es ist zwar möglich, den Strom zu speichern, dies ist jedoch mit Energieverlusten verbunden.

⁵² ITER: ITER Homepage [online], o.J. <https://www.iter.org/>, 22.02.2020.

Atomarer Strom

Nuklearreaktoren produzieren zwar viel Strom mit hoher Verlässlichkeit, produzieren allerdings als Endprodukt radioaktiven Abfall, welcher in einem Endlager gesichert werden muss. Mit einem solchen Endlager sind ebenfalls viele Probleme verbunden, wie zum Beispiel die Frage, wie man noch in den künftigen Jahrhunderten dies als Endlager markieren kann.

4. Fazit

Die Fusion ist die Energiequelle der Sonnen. Aus leichten Stoffen werden schwerere und lassen dabei Energie frei. In einem Plasma werden Nuklei von ihren Elektronen getrennt, da die Energie des Systems größer ist, als die Energie, welche die Atome zusammenhält. Treffen zwei Nuklei mit hoher kinetische Energie aufeinander und überwinden dabei die Coulombkraft fusionieren sie. Für die Fusion als Treibstoff Deuterium oder Tritium verwendet, beide sind Isotope von Wasserstoff und sind für die Fusion gut geeignet, aufgrund ihrer geringen Ordnungszahl.

Es gibt noch viele andere Typen von Fusionsreaktoren welche auch noch untersucht werden müssten, um noch genereller sagen zu können, in wie fern Fusionsreaktoren unseren zukünftigen Strom produzieren können.

Interessant ist auch, wie sich leistungsstärkere Computer und künstliche Intelligenz auf die Forschung auswirken. Der Fusionsreaktor des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik wurde von einem Supercomputer designt für eine optimale Form.

Wie Fusionsreaktoren im Grundlegendem funktionieren wurde nun von der Arbeit geklärt. Ob Fusions-Unternehmen uns bald Strom anbieten liegt noch offen. Die Fusion hat viele Vorteile gegenüber anderen Stromquellen, ist aber sehr teuer und steckt noch in der Entwicklung. Es liegt aber nicht mehr an der Wissenschaft diese Reaktoren weiter zu entwickeln, sondern an privaten Unternehmen, welche die Technologie nutzen und diesen Nutzen für die Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen.

ANHANG

Formelzeichen und Einheiten

A :	(Queerschnitts-) Fläche	(hier) mm^2	Millimeter ²
a :	Beschleunigung	ms^{-2}	Meter pro Sekunde ²
B :	Magnetische Feldstärke	T	Tesla
c :	Naturkonstante - Lichtgeschwindigkeit	ms^{-1}	Meter pro Sekunde
E :	Energie ($E \triangleq P$)	J	Joule
F :	Kraft	N	Newton
F_c :	Coulombkraft	N	Newton
F_L :	Lorentzkraft	N	Newton
l :	Länge	m	Meter
m :	Masse	kg	Kilo-Gramm
m_A :	Atommasse	u	
n_e :	Anzahl von Elektronen pro m^3	m^{-3}	1 durch m^3
n_i :	Anzahl von Ionen pro m^3	m^{-3}	1 durch m^3
n_Z :	Anzahl eines Atoms der Ordnungszahl Z (Statt Z , Elementabkürzung)	Einheitslos	
P_{br} :	Energie der Bremsstrahlung pro m^{-3}	Wm^{-3}	Watt pro Meter ³
P_f :	Aus Fusion gewonnene Energie	W	Watt
P_h :	Dem Reaktor zugegebene Energie	W	Watt
P_{sync} :	Energie der Synchrotronstrahlung pro m^{-3}	Wm^{-3}	Watt pro Meter ³
q :	Elektrische Ladung	c	Coulomb
R :	Elektrischer Widerstand	Ω	Ohm
R_0 :	Elektrischer Widerstand eines Stoffes bei 293 K	Ω	Ohm
T :	Temperatur	K	Kelvin
T_c :	Sprungtemperatur	K	Kelvin
T_e :	Temperatur der Elektronen	eV	Elektronenvolt
v :	Geschwindigkeit	ms^{-1}	Meter pro Sekunde

Q :	Verhältnis von P_f zu P_h	Einheitslos	
Z :	Ordnungszahl eines Atoms	Einheitslos	
α :	(Hier) Temperaturkoeffizient	K^{-1}	1 durch Kelvin
ρ :	(Hier) Spezifischer Widerstand	$\Omega \frac{mm^2}{l}$	Ohm-Millimeter ² durch Meter

Chemische Stoffe

${}^2H^+$:	Deuterium
γ :	Gammastrahlung
He :	Helium
He^{2+} :	Helium-Ion
${}^3He^{2+}$:	Helium-3-Ion
ν :	Neutrino
n :	Neutron
Nb :	Niob
e^+ :	Positron
H^+ :	Proton

Erklärungen

Blasenbildung (eng. blistering) - Atome, welche aus dem Plasma Austreten durchdringen oft die ersten Atomschichten der Wand und werden dabei abgebremst. Diese austretenden Atome setzen sich dann gasförmig innerhalb der Wand ab. Da sich diese mit der Zeit ansammeln bilden sich Gasblasen in der Wand. Aufgrund des steigenden Drucks der Blasen, steigt die Verformung und die Stabilität der Wand sinkt, bis zur Explosion der Blasen (M-E-1). Die Blasenbildung hängt dabei ab von:

- (1) Der Energie des ausgetretenen Atoms bestimmt die Eindringungstiefe.
- (2) Wie sehr das Element diffundiert - Je geringer die austretenden Atome diffundieren, desto höher der Blasenbildung.
- (3) Die Anzahl der austretenden Atome bestimmt die Größe der Blasen.
- (4) Die Temperatur der austretenden Atome bestimmt den Faktor der Diffusion.

(Niu, Keishiro: 1989, 180 f.f.).

Bremsstrahlung - Sie entsteht, wenn sich zwei gleich geladene Teilchen aufgrund ihres elektrischen Feldes voneinander abstoßen / anziehen und somit die Coulombkraft aufeinander ausüben. Da sich die Strahlung nahezu ungehindert durch das Plasma bewegt, kann die Energie nicht vom Plasma wieder aufgenommen werden, diese muss entweder Außerhalb abgefangen werden oder sie geht verloren. Die durch Bremsstrahlung verlorene Energie lässt sich durch folgende Formel beschreiben:

$$P_{br} = 1,5 * 10^{-38} Z^2 n_i n_e \sqrt{T_e}$$

Aufgrund dessen, dass Z ein Faktor ist, sind Elemente mit niedriger Ordnungszahlen effizienter im Plasma, da sie geringere Mengen an Bremsstrahlung verursachen. Innerhalb des Fusionsplasmas ist sie häufiger vertreten als die Synchrotronstrahlung.

(Hagler; Kristiansen: 1977, 16 f.).

Mining The Moon - Es ist möglich Tritium vom Mond zu gewinnen. Aus einer Fläche von knapp 2 km², welche etwa 2,75 m tief ist, lässt sich genug Helium-3 extrahieren um eine Stadt der Größe von Dallas oder Detroit zu versorgen, knapp 100 kg. Das Filtern von Tritium aus Mondgestein ist kein Aufwendiger Prozess, da das Mondgestein nur geringfügig erhitzt werden muss, um das gasförmige Helium-3 freizusetzen, wonach es mithilfe einer semipermeablen Membran von Helium gefiltert werden kann.

(Schmitt, Harrison H.: Mining the Moon [online], 08.2004, (14.01.2005).

<http://www.searchanddiscovery.com/documents/2004/schmitt/>, 09.02.2020).

Sputtern (engl. *sputtering*) - Exklusiv für Fusionsreaktoren - Sputtern beschreibt das Kollidieren von austretenden Atomen, welche gegen die erste Wand stoßen und diese zerstören, durch das Herausschlagen von Atomen der Wand.

Das anliegende Diagramm⁵³ zeigt das Verhältnis von gesputterten Atomen zu herausgetretenden Atomen aufgetragen auf die enthaltene Energie der heraustretenden Atome. Herausgetretene Atome sind Atome des Treibstoffs, sie sind leicht, mit Ausnahme von Niob. Durchgezogene Kurven zeigen das Verhältnis beim Aufprall mit einer Niob Wand und gestrichelte Kurven zeigen das Verhältnis beim Aufprall mit rostfreiem Stahl.

Aus dem Diagramm ist zu entnehmen, dass schwerere Atome mehr Schaden anrichten als leichtere. Bei einer D-D-Reaktion mit einer Nb-Wand würde nach 10 Jahren ca. 3,4 mm der Wand abgetragen sein.

(Niu, Keishiro: 1989, 179 f.).

Supraleiter - Die Idee von Supraleitern ist, dass Elektronen keinen elektrischen Widerstand erfahren wenn sie sich durch einen elektrischen Leiter bewegen. Dazu muss der Leiter möglichst kalt sein, damit sich die Atomkerne kaum bewegen und nicht den Elektronen in den Weg kommen. Viele Stoffe können supraleitend⁵⁴ werden unter einer element spezifischen Sprungtemperatur $T_c \leq 10^{\circ}K$. Bestimmte Stoffgemische können auch schon bei höheren Temperaturen supraleitend werden.

⁵³ Siehe: Anhang - Bildmaterial - M-E-2.

⁵⁴ Siehe: Anhang - Bildmaterial - M-E-3 und M-E-4.

Der elektrische Widerstand, abhängig von der Temperatur, lässt sich näherungsweise berechnen durch $R(T) = R_0(1 + \alpha * \Delta T)$. Der Spezifische Widerstand $\rho = R \frac{A}{l}$ ist proportional zu $R(T)$, $\rho(T) \sim R(T)$.

Damit Supraleiter ihre Supraleitfähigkeit nicht verlieren, müssen sie ständig gekühlt werden. Als Kühlmittel wird in Fusionsreaktoren flüssiges Helium verwendet. Die tatsächliche Temperatur liegt demnach bei $T \geq 3^\circ\text{K}$.

(Niu, Keishiro: 1989, 223; Dr. Ackermann, Peter; Becker, Peter; Böhlemann, Ralf; Dr. Breuer, Elmar; Burzin, Stefan; Busch, Carsten; Dr. Diehl, Bardo; Dörr, Jochen; Prof. Dr. Erb, Roger; Dr. Jutzi, Karl-Heinz; Dr. Reinhard, Bernd; Prof. Dr. Schön, Lutz-Helmut; Schulze, Helmke; Dr. Schulze, Peter M.; Dr. Tews, Wolfgang; Dr. Winter, Rolf: Physik. Fokus. Gesamtband. Gütersloh: Cornelsen, 2018., 382 f.).

Synchrotronstrahlung - Formeln gelten nur näherungsweise für ein Wasserstoff-Plasma - Sie entsteht durch die Beschleunigung von geladenen Teilchen, im Bereich von Infrarot bis Mikrowellen-Größe, bei einer Rotation, erzeugt durch die Lorentzkraft:

$$F_L = q(E + v * B)$$

Dies ist einsetzbar in Newtons 2. Axiom, umgestellt nach der Beschleunigung. Daraus erkennt man, dass sich Elektronen leichter beschleunigen lassen, als

$$\begin{aligned} F & \\ &= m * a \quad |:ma \\ &= \frac{F}{m} \end{aligned}$$

Ionen, da sie leichter sind. Daher sind Elektronen hauptverantwortlich für die Synchrotronstrahlung. Sie lässt sich beschreiben durch:

$$P_{sync} = 10^{-19} n_e B^2 T_e$$

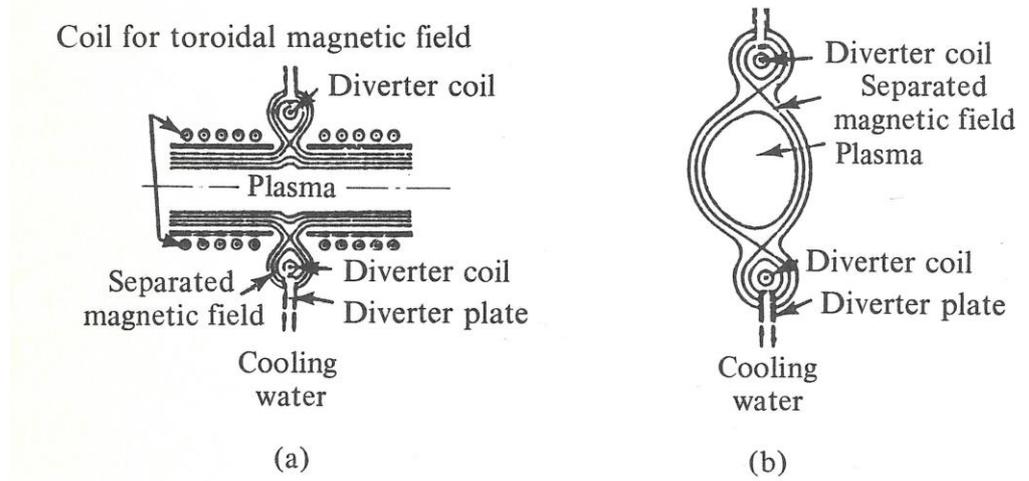
Im Gegensatz zur Bremsstrahlung kann die Synchrotronstrahlung vom Plasma absorbiert werden, wodurch der Verlust geringer ist als der bei der Bremsstrahlung, hier können sogar reflektierende Schichten an den Wänden des Reaktors installiert werden, um austretende Strahlung wieder in das Plasma zu reflektieren. Allerdings steigt die Synchrotronstrahlung mit höherer Temperatur schneller an, als die Bremsstrahlung.

(Hagler; Kristiansen: 1977, 16 f.).

Bildmaterial und -Quellen

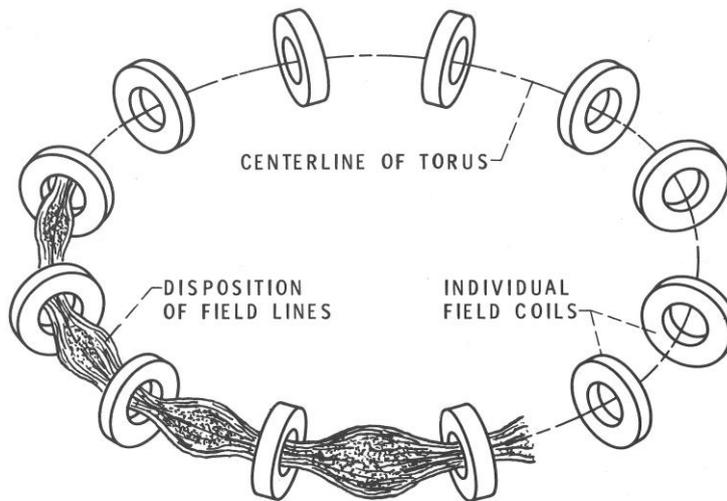
M-2-1 The Divorter

(Niu, Keishiro: 1989, 184 Fig. 4.7.)



M-2-2 The Bumpy Torus

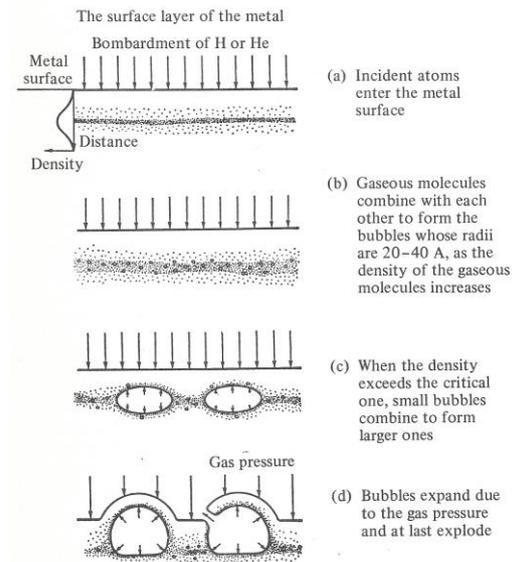
(Hagler; Kristiansen: 1977, 150 Figure 7-1)



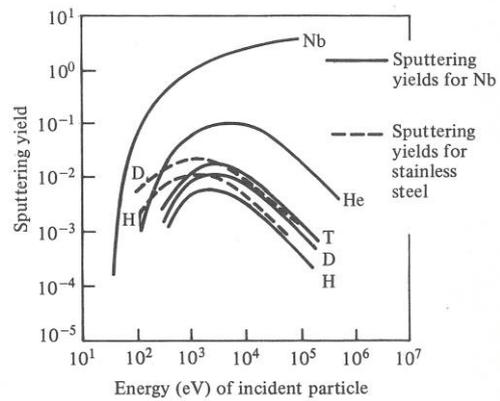
M-2-3 Classification of types of reactor according to the method of plasma confinement (Niu, Keishiro: 1989, 172 Fig. 4.1., verändert)

Method of confinement	Configuration of magnetic field	Facility	Operation mode
Magnetic confinement	Torus	Tokomak	Quasi-steady
		Reverse field pinch	Quasi-steady
		Stellarator	Steady
		Heliotron	Steady
	Open end	Torus pinch	Pulse
		Mirror	Steady
		Straight pinch	Pulse
Inertial confinement		Plasma focus	Pulse
		Laser	Pulse
		REB	Pulse
		LIB	Pulse
		HIB	Pulse
		Projectile	Pulse

M-E-1 The mechanism of blistering
(Niu, Keishiro: 1989, 180 Fig. 4.3.)

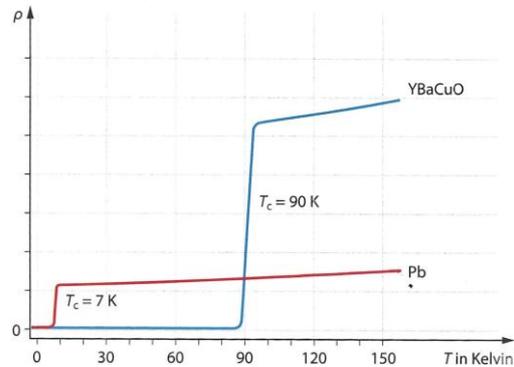


M-E-2 Sputtering Yields
(Niu, Keishiro: 1989, 179 Fig. 4.2.)



M-E-3 Spezifischer Widerstand von Blei und einer YBaCuO-Verbindung in Abhängigkeit von der Temperatur

(Fokus Physik, 382 2)



M-E-4 Supraleitende Stoffe - Sprungtemperatur

(<https://fs.magnet.fsu.edu/~lee/lee-superconductor-history.htm>)

	IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII	IX	X	XI	II	III	IVA	VA	VIA	VIIA	0	
1	1 H																	2 He	
2	3 Li	4 Be 0.026												5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg												13 Al 1.176	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti 0.40	23 V 5.40	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn 0.85	31 Ga 1.10	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr 0.61	41 Nb 9.25	42 Mo 0.912	43 Tc 7.80	44 Ru 0.49	45 Rh 0.0003	46 Pd	47 Ag	48 Cd 0.517	49 In 3.4	50 Sn 3.72	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf 4.8	73 Ta 0.128	74 W 4.47	75 Re 0.154	76 Os 1.697	77 Ir 0.66	78 Pt 0.113	79 Au	80 Hg 4.15	81 Tl 1.70	82 Pb 7.2	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac																
			Lanthanide Series	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd 1.033	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu 0.100		
			Actinide Series	90 Th 1.39	91 Pa 1.4	92 U 0.18	93 Np	94 Pu	95 Am 1.179	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

Literaturverzeichnis

Bücher

Dr. Ackermann, Peter; Becker, Peter; Böhlemann, Ralf; Dr. Breuer, Elmar; Burzin, Stefan; Busch, Carsten; Dr. Diehl, Bardo; Dörr, Jochen; Prof. Dr. Erb, Roger; Dr. Jutzi, Karl-Heinz; Dr. Reinhard, Bernd; Prof. Dr. Schön, Lutz-Helmut; Schulze, Helmke; Dr. Schulze, Peter M.; Dr. Tews, Wolfgang; Dr. Winter, Rolf: Physik. Fokus. Gesamtband. Gütersloh: Cornelsen, 2018.

Hagler, M. O.; Kristiansen M.: An Introduction to Controlled Thermonuclear Fusion. Kanada: Lexington Books, 1977.

Niu, Keishiro: nuclear fusion. Newcastle Upon Tyne: Athenæum Press, 1989.

Stacey, Weston M.: Fusion. An Introduction to the Physics and Technology of Magnetic Confinement Fusion. Second, Completely Revised and Enlarged Edition. PHYSICS TEXTBOOK. Darmstadt: WILEY-VCH, 2010.

Internetquellen

Bourzac, Kather: Fusion start-ups hope to revolutionize energy in the coming decades [online], 06.08.2018. <https://cen.acs.org/energy/nuclear-power/Fusion-start-ups-hope-revolutionize/96/i32>, 22.02.2020.

Clark, Stephen: Musk previews busy year ahead for SpaceX [online], 04.04.2017. <https://spaceflightnow.com/2017/04/04/musk-previews-busy-year-ahead-for-spacex>, 09.02.2020.

ITER: ITER Homepage [online], o.J. <https://www.iter.org/>, 22.02.2020.

NASA: The Solar Interior [online], o.J.. <https://solarscience.msfc.nasa.gov/interior.shtml>, 05.01.2020.

Schmitt, Harrison H.: Mining the Moon [online], 08.2004, (14.01.2005).
<http://www.searchanddiscovery.com/documents/2004/schmitt/>, 09.02.2020

Sharp, Tim: How Hot Is the Sun? [online] 19.08.2017,
<https://www.space.com/17137-how-hot-is-the-sun.html>, 05.01.2020.

Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die Hausarbeit ohne Fremde Hilfe angefertigt, nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt und alle Textstellen, die ich mit dem Wortlaut aus Quellen übernommen habe, entsprechend kenntlich gemacht habe⁵⁵.

Ort/Datum

Unterschrift

Freiwillige Erklärung

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird⁵⁶.

Ort/Datum

Unterschrift

⁵⁵ Bunte, Christopher: Seminarfach Bunte - Verlaufsplan Facharbeit. o.O., 2020.

⁵⁶ Ebenda.