

Energie- gewinnung durch kontrollierte Fusion von Stoffen

Hausarbeit
Emanuel Förder

Mentor: Tobias Adam
Fritz-Philippi-Schule
Prüfung: 22.11.2022
Fach: Physik

Inhaltsverzeichnis

1. Kernfusion: Potenzielle Energiequelle der Zukunft?	2
2. Physikalische Grundlagen	2
2.1 Was ist Kernfusion und was findet dabei statt?	2
2.2 „Die Sonne auf der Erde“	3
2.3 Deuterium-Tritium-Reaktion	4
3. Physikalische Voraussetzungen	5
3.1 Plasmatemperatur und erforderliche Geschwindigkeit.....	5
3.2 Magnetfeld zum Kontrollieren der Plasmapartikel	6
3.3 Brennstoff: Vorkommen, Beschaffung und Erzeugung	6
3.4 Lawson-Kriterium	7
4. Stand der Forschung	8
4.1 Forschungshistorie.....	8
4.2 Erfolge und Grundlagen für heutige Forschungen.....	9
4.3 Forschungsanlage ITER	9
4.4 Testanlage DEMO	12
5. Fusionsanlagen und technische Herangehensweisen	13
5.1 Tokamak.....	13
5.2 Stellarator	14
5.3 Trägheitseinschluss mit Lasern.....	14
5.4 Energiegewinn	16
6. Kernfusion im Vergleich zu heutigen Energiequellen	16
6.1 Nachteile von gegenwärtigen Kraftwerken	16
6.2 Vorteile der Kernfusion.....	17
6.3 Ist Kernfusion gefährlich?.....	18
7. Fazit	18
8. Quellen	19
8.1 Literaturverzeichnis	19
8.2 Internetverzeichnis	19
8.3 Abbildungsverzeichnis	21
8.4 Definitionen.....	21
9. Bildanhang	22
10. Eidesstattliche Erklärung	22

1. Kernfusion: Potenzielle Energiequelle der Zukunft?

Die aktuelle Energiekrise sowie eine fortsetzend wachsende Bevölkerung und immer fortschrittlichere Technologie zwingen uns Menschen, nach neuen alternativen Energiequellen zu suchen. Eine Energiequelle, die keine langlebigen radioaktiven Abfälle produziert, weniger Platz beansprucht, witterungsbeständig ist und mehr Energie produziert als traditionelle nachhaltige Energiequellen wie Windkraftanlagen und Sonnenkollektoren. Doch ist so etwas überhaupt möglich?

Eine der natürlichen Energiequellen, die in großem Umfang von unserer Sonne und anderen Sternen betrieben wird, ist die Kernfusion.¹ Seit den 1960er Jahren träumen viele Wissenschaftler davon, diese natürliche Art der Energie auf der Erde nutzbar zu machen, als unbegrenzte, saubere und sichere Energiequelle.

Nachdem ich mich anfangs erstmal nur oberflächlich mit verschiedenen Themen befasst hatte, bekam ich starkes Interesse am Thema Kernfusion und mir war schnell klar, dass ich meine Hausarbeit darüber schreiben möchte.

In dieser Hausarbeit möchte ich u.a. den Vorgang von Kernfusion erklären. Dabei soll vor allem der wirtschaftliche Nutzen und die Forschungsarbeit, die noch nötig ist, im Fokus stehen. Es wird erläutert werden, warum Fusionsenergie so sicher ist und wie sie als Kraftwerke nutzbar ist.

2. Physikalische Grundlagen

2.1 Was ist Kernfusion und was findet dabei statt?

Die Ursache dafür, dass alle leuchtenden Sterne und auch unsere Sonne Energie abstrahlen ist Kernfusion.² In diesen Sternen finden Fusionsreaktionen zwischen Atomen als sog. thermonukleare Prozesse³ statt. „Die dabei freigesetzte Energie wird als elektromagnetische Strahlung in das Weltall abgestrahlt und macht Leben auf der Erde erst möglich.“⁴ Im Sterninneren ist es so

¹ vgl. Q1: „Warum Fusionskraft die Welt retten kann“, 100SekundenPhysik, YouTube, 02.06.2019, <https://www.youtube.com/watch?v=fBJ7MW2daPU>

² vgl. Q2: „Kernfusion“, Wikipedia, 17.01.2022, <https://de.wikipedia.org/wiki/Kernfusion>, (Stand: 27.09.2022)

³ D1 „Thermonukleare Prozesse“: Bei einem thermonuklearen Prozess, wie der Kernfusion, ist alles so heiß, dass Atome ihre Elektronen verlieren. Es bleiben also nur noch die Protonen übrig.

⁴ Q3: „Grundlagen der Kernfusion“, Deutsche Physikalische Gesellschaft, <https://www.dpg-physik.de/vereinigung/fachlich/smuk/fvp/weiterfuehrende-informationen/grundlagen-der-kernfusion>, (Stand: 08.10.2022)

heiß, dass ein Plasma entsteht, „(...) in dem Atomkerne und Elektronen frei herumschwirren.“⁵ Da diese Plasmen so heiß sind (Millionen von Grad Celsius), haben die sich eigentlich abstößenden, positiv geladenen Atomkerne die nötige Geschwindigkeit, um, statt aneinander abzuprallen, zu kollidieren und zu fusionieren. Aus zwei Atomkernen wird einer. Diese Fusionsreaktion, bei der in der Sonne jede Sekunde „(...) rund 600 Millionen Tonnen Wasserstoff zu 596 Millionen Tonnen Helium“⁶ umgewandelt werden, setzt jedes Mal eine große Menge Energie frei. Dieses natürliche Verfahren zur Energiegewinnung wollen sich Wissenschaftler zu Nutze machen.

2.2 „Die Sonne auf der Erde“

Wenn man von Fusionsenergie spricht, spricht man auch oft von einer ‚künstlichen Sonne auf der Erde‘. Forscher wollen das energieerzeugende Verfahren der Sonne in sog. Kernfusionskraftwerken verwenden und die im Plasma freiwerdende Energie nutzen. Heute gibt es dazu mehrere Konzepte. In dieser Hausarbeit werden weiter hinten alle drei Hauptherangehensweisen beschrieben: Das Tokamak-Konzept, das Stellarator-Konzept, welches auf dem Tokamak-Konzept aufbaut und ein großes Problem löst und die Kernfusion mit Lasern bzw. der Trägheitseinschluss. Es sind Konzepte, um das Plasma sicher und effizient einzuschließen, denn das ist heutzutage noch eines der Hauptprobleme. Die Forschung ist mit dem Tokamak- und dem Stellarator-Konzept deutlich weiter als mit dem Trägheitseinschluss. In dieser Hausarbeit geht es deshalb hauptsächlich um die ersten beiden Konzepte, die Fusion mit Lasern wird später kurz erwähnt.

Der Titel „Die Sonne auf der Erde“ ist eigentlich nicht ganz richtig. Die Fusionsreaktionen, die in der Sonne und anderen Sternen ablaufen sind nämlich aufgrund ihres sehr geringen ‚Wirkungsquerschnitts‘⁷, wozu man auch sehr viele Protonen benötigen würde, auf der Erde schwer umsetzbar bis nicht möglich. Außerdem läuft diese sog. Proton-Proton-Reaktion (Fusionsreaktion der Sonne) in der Sonne sehr langsam ab.⁸ Ein weiteres Problem wäre die ‚schwache

⁵ Q4: „Energie der Zukunft oder kompletter Reinfall? - Fusionsenergie erklärt“, Dinge Erklärt – Kurzgesagt, YouTube, 26.08.2020, <https://www.youtube.com/watch?v=Ij4IC70kDIU>

⁶ Q5: „Pro Sekunde vier Millionen Tonnen Energie“, Dirk Lorenzen, Deutschlandfunk, 15.06.2015, [\(Stand: 27.09.2022\)](https://www.deutschlandfunk.de/astronomie-pro-sekunde-vier-millionen-tonnen-energie-100.html)

⁷ D2 „Wirkungsquerschnitt“: Der Wirkungsquerschnitt ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung zwischen Reaktionspartnern bei einer bestehenden Reaktion, mit verschiedenen Faktoren, z.B. Energiemenge.

⁸ vgl. Q6: „Kernfusion - Energiequelle der Zukunft?“, M. C. Kaluza, in *Öffentliche Samstagsvorlesung (Wintersemester 2020/21)*, 05.12.2020, https://www.db-thueringen.de/receive/dbt_mods_00047287

Wechselwirkung⁹, die bei der Reaktion aufgebracht werden muss und die bei der Fusion entstehende Gamma-Strahlung (Röntgen-Strahlung).

Eine auf der Erde gut umsetzbare Fusionsreaktion sollte deshalb ohne schwache Wechselwirkung und ohne Gamma-Strahlung funktionieren, pro Reaktion sollte möglichst viel Energie rauszuholen sein und die Reaktionspartner sollten leicht verfügbar sein. Diese Voraussetzungen erfüllen vier Reaktionsgleichungen, die für uns denkbar wären.¹⁰ Im nächsten Abschnitt wird die hier auf der Erde sinnvollste und effizienteste von den vier Möglichkeiten erklärt.

2.3 Deuterium-Tritium-Reaktion

In der Natur kommen verschiedene ‚Varianten‘ von Atomen vor. Diese sog. ‚Isotope‘ haben dieselbe Anzahl an Protonen (positiv-geladene Teilchen im Atomkern) weisen jedoch unterschiedlich viele Neutronen (neutral-geladene Teilchen), im Vergleich zur ‚gängigen Atomvariante‘ auf.

Das positiv-geladene Deuterium (^2H o. ^2D) ist ein Isotop von Wasserstoff (^1H) mit einem Proton und einem Neutron im Atomkern. Es kommt in den Weltmeeren in großen Mengen vor und ist ein stabiles Isotop. Das ebenfalls positiv-geladene Tritium (^3H o. ^3T), welches auch ein Wasserstoff-Isotop ist, das auf der Erde jedoch sehr selten vorkommt (s. 3.3), hat ebenfalls ein Proton, jedoch zwei Neutronen im Kern und fusioniert bei der D-T-Reaktion mit dem Deuterium.¹¹

„Im Labor wurde bewiesen, dass die Fusion von Deuterium- (D) und Tritium- (T) Atomen den höchsten Energiegewinn bei den „niedrigsten“ Temperaturen erzeugt.“¹² Daher soll diese Fusionsreaktion in Fusionskraftwerken zur Energiegewinnung genutzt werden.

„Da Atomkerne elektrisch geladen sind und sich deswegen mit abnehmendem Abstand immer mehr gegenseitig abstoßen, kann eine Kernfusion grundsätzlich nur erfolgen, wenn die Atomkerne mit extrem hoher Energie aufeinander prallen.“¹³ In sehr heißem Plasma treffen also, durch die Hitze ionisierte, Kerne aufeinander und fusionieren. Bei unserer Deuterium-Tritium-

⁹ D3 „Schwache Wechselwirkung“: Die schwache Wechselwirkung (WW) macht die Umwandlung von Protonen in Neutronen, und somit Kernfusion, in der Sonne möglich.

¹⁰ vgl. Q6: „Kernfusion - Energiequelle der Zukunft?“

¹¹ vgl. Q7: „Kernspaltung und Kernfusion“, LEIFIphysik, <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/kern-spaltung-und-kernfusion/grundwissen/kernfusion>, (Stand: 11.10.2022)

¹² Q8a: „Betankung der Fusionsreaktion“, ITER, <https://www.iter.org/sci/fusionfuels>, (Stand: 30.09.2022), übersetzt

¹³ Q9: „Kernfusion“, Dr. Rüdiger Paschotta, RP-Energie-Lexikon, 10.07.2011, <https://www.energie-lexikon.info/kernfusion.html>, (Stand: 11.10.2022)

Reaktion wandeln sich diese nach der Fusion in ein Helium-Atom und in ein Neutron um. Dieser Vorgang setzt eine hohe Menge Energie frei. (Der Reaktionsvorgang und die Reaktionsprodukte werden weiter hinten genauer erläutert.)

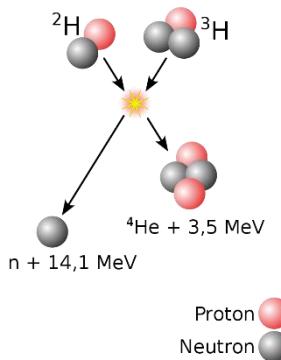


Abbildung 1: Deuterium-Tritium-Reaktion



Abbildung 2: Fusion grafisch dargestellt

3. Physikalische Voraussetzungen

3.1 Plasmatemperatur und erforderliche Geschwindigkeit

Damit eine Fusion zwischen zwei Atomkernen stattfinden kann, muss diese Materie als Plasma vorliegen. Plasma ist der vierte Aggregatzustand, der entsteht, wenn man ein Gas sehr stark erhitzt. Wie bereits weiter oben beschrieben, verlieren die Atome bei der Hitze ihre Elektronen (D1). Positiv-geladene Kerne (Protonen, p^+) und negativ-geladene Elektronen (e^-) fliegen im Plasma frei herum. Da sich die positiven Atomkerne gegenseitig abstoßen, muss deren Geschwindigkeit enorm hoch sein, damit sie sich nicht abstoßen, sondern fusionieren. Dies ist nur bei extrem hohen Plasmatemperaturen von ca. 15mio. Grad Celsius und hohem Druck möglich.¹⁴ Diese Voraussetzungen erfüllen Sterne wie unsere Sonne. Da wir auf der Erde jedoch keinen so einen starken Druck erzeugen können, müssen die Temperaturen, zur Fusion im Plasma, innerhalb eines Fusionsreaktors, im Bereich von 100 bis 150mio. Grad Celsius liegen!¹⁵ Der Vorteil daraus ist, dass man zum einen keinen hohen Druck benötigt, die Fusion dadurch jedoch auch mit viel weniger Brennstoff als in der Sonne nötig stattfindet. Jedoch kann kein Material der Welt dieser extremen Hitze standhalten.

¹⁴ vgl. Q4: „Energie der Zukunft oder kompletter Reinfall?“

¹⁵ vgl. Q8b: „Erreichen von 150.000.000 °C“, ITER, <https://www.iter.org/sci/plasmaheating>, (Stand: 12.10.2022), übersetzt

Um das Plasma dennoch bei den erforderlichen Temperaturen für Fusionen nutzen zu können, forschen Wissenschaftler seit Jahrzehnten, wie man das Plasma einschließen kann, ohne dass dieses seine Einschlusshülle beschädigt. Im weiteren Verlauf werden die bereits erwähnten Einschlusskonzepte beschrieben.

3.2 Magnetfeld zum Kontrollieren der Plasmapartikel

Wie gerade erwähnt, bewegen sich die Partikel im über 100mio. Grad heißem Plasma extrem schnell. „Würde man diesen Prozess sich selbst überlassen, würden sich diese Bestandteile bald so weit voneinander entfernen, dass Kollisionen äußerst unwahrscheinlich werden.“¹⁶ Um die Plasmaatome kontrollieren zu können, nutzen die Wissenschaftler dasselbe Prinzip, welches auch zum Plasmaeinschluss, der im vorigen Absatz angeschnitten wurde, verwendet wird. Sie nutzen ein Magnetfeld, welches 10.000-mal stärker ist als das unserer Erde. Weiter hinten wird dies, wie gesagt genauer erklärt.

3.3 Brennstoff: Vorkommen, Beschaffung und Erzeugung

Unsere Sonne verwendet für ihre Fusionen reinen Wasserstoff. Um jedoch eine positive Energiebilanz zu erhalten, sprich damit man mehr Energie rausholt, als man reingesteckt hat, werden, wie schon erwähnt, die schwereren Wasserstoff-Isotope Deuterium und Tritium verwendet. „Da [diese Ausgangskerne] deutlich schwerer sind als die [aus der Fusionsreaktion] neu entstandenen Heliumkerne, entsteht bei der Fusionsreaktion eine große Massendifferenz. Grund dafür liegt in Einsteins Masse-Energie-Äquivalenz-Formel: $E=mc^2$.“¹⁷ Dies hat Energiegewinn zur Folge, welche im Fall der Sonne als Wärme abgegeben wird.

Für die Fusion werden, wie gesagt, Deuterium und Tritium benötigt. Deuterium „[...] bietet den Vorteil, dass ein nahezu unbegrenzter Vorrat [davon in herkömmlichem Wasser, z.B. Meerwasser] vorhanden ist.“¹⁸ „In jedem Kubikmeter Meerwasser sind beispielsweise 33 Gramm Deuterium enthalten.“¹⁹ Außerdem wird es regelmäßig für industrielle und wissenschaftliche Gebräuche hergestellt.

¹⁶ Q10: „Wie man perfekte Fusionsbedingungen erzeugt“, EUROfusion, <https://www.euro-fusion.org/de/fusion/bedingungen-fuer-die-kernfusion/#:-:text=Einschlusszeit-,Temperatur,an%20den%20Brennstoff%20abgeben%20k%C3%B6nnen.,> (Stand: 21.10.2022)

¹⁷ Q1: „Warum Fusionskraft die Welt retten kann“

¹⁸ Q11: Günther Kirchberger: „Knaurs Neues Jugendlexikon“, Knaur Verlag, München 1998, S. 347

¹⁹ Q8c: „Damit es funktioniert“, ITER, <https://www.iter.org/sci/makingitwork,> (Stand: 12.10.2022), übersetzt

Anders als beim am Vorkommen nahezu unbegrenztem Deuterium findet man auf der Erde vom Reaktionspartner Tritium schätzungsweise gerade einmal 20kg!²⁰ „Derzeit stammt Tritium für Fusionsexperimente [...] aus einer sehr spezialisierten Art von Kernspaltungsreaktor[en, die [...] als schwerwassermoderierte Reaktor[en] (ca. 30 weltweit in Betrieb) bekannt [sind, welche jeweils ca. 100 Gramm Tritium pro Jahr erzeugen. ... Ein einziges Gramm kostet ca. 30.000 Dollar.]“²¹

Aus diesem Grund entwickelte man eine Methode, um Tritium während der eigentlichen Kernfusion aus den Reaktionsprodukten herzustellen zu können. Um den Plasmakessel im Fusionsreaktor befindet sich eine Lithium-Schicht. Die Neutronen, die bei der Fusionsreaktion entstehen, werden an diese Schicht abgegeben. „Das ankommende Neutron wird vom Lithiumatom absorbiert, das sich zu einem Tritiumatom und einem Heliumatom rekombiniert. Das Tritium kann dann aus der Decke entfernt und als Brennstoff in das Plasma zurückgeführt werden. (...) Durch [diese Schicht] kann Tritium unbegrenzt gezüchtet werden. Sobald die Fusionsreaktion in einem Tokamak etabliert ist, sind Deuterium und Lithium die externen Brennstoffe, die zu ihrer Aufrechterhaltung erforderlich sind. Beide Kraftstoffe sind leicht verfügbar.“²²

3.4 Lawson-Kriterium

Das Lawson-Kriterium ist die physikalische Bedingung dafür, dass sich eine im Plasma ablauende Kernfusionsreaktion selbstständig aufrechterhält.

Bei der Fusion von Deuterium und Tritium entstehen, wie bereits zuvor erwähnt, ein Neutron und ein Helium-Atom. Beide enthalten jeweils eine bestimmte Menge Energie. Während die Energie des Neutrons zur Energiegewinnung an die Lithium-Schicht abgegeben wird, heizt das geladene Helium-Alpha-Teilchen, welches im Plasma verbleibt, das Plasma durch Stöße weiter auf. Es gibt seine 3,5 MeV Bewegungsenergie, mit einer sog. „Fusionsleistung $P_{f,\alpha}$ “, an das Plasma ab. „Gleichzeitig verliert das Plasma Energie durch Bremsstrahlung und Transport; dies ist die [sog. „Verlustleistung P_v]“²³

Das Lawson-Kriterium ergibt sich aus dem Gleichgewicht dieser beiden Leistungen: $P_{f,\alpha} = P_v$. Wird dieses Kriterium in einem Deuterium-Tritium-Plasma erfüllt, „brennt“ dieses dann ohne

²⁰ vgl. Q12: „Großer Durchbruch“, Ashish Dangwal, EurAsian Times, 04.06.2022, (Link in Quellenverzeichnis), (Stand: 12.10.2022), übersetzt

²¹ Q12: „Großer Durchbruch“

²² Q8a: „Betankung der Fusionsreaktion“

²³ Q13: „Lawson-Kriterium“, Wikipedia, 27.11.2019, <https://de.wikipedia.org/wiki/Lawson-Kriterium>, (Stand: 24.10.2022)

weitere Zufuhr von externer Energie weiter und liefert „[...] seinerseits Energie als kinetische Neutronenenergie. In Kernwaffen und auch in Trägheitsfusions-Reaktoren muss das Kriterium erfüllt sein. In Magneteinschluss-Fusionsreaktoren muss es dagegen nicht vollständig erfüllt werden; eine gewisse ständige nötige Fremdheizung (mit z. B. einigen Prozent der gewonnenen Neutronenenergie) hätte sogar den Vorteil, eine zusätzliche Steuermöglichkeit der Reaktion zu bieten.“²⁴

Für einen reibungslosen Ablauf der Fusion in einem Kernfusionskraftwerk muss also die Menge an Energie, die das Plasma, durch die bei der Fusion entstehenden Helium-Teilchen, neu hinzubekommt im Gleichgewicht mit der Menge an Energie sein, die es durch natürliche Umstände verliert.

Berechnet man das Lawson-Kriterium für die D-T-Reaktion, „[ergibt sich daraus die benötigte Temperatur von ca. 150 Mio. Grad Celsius] (zehnmal höher als im Kern der Sonne) und ein Druck von einigen Bar (mehrere Größenordnungen geringer als im Kern der Sonne). Bei diesen technisch erreichbaren Werten ist der Wirkungsquerschnitt der D-T-Reaktion weit größer als der für den ersten Schritt der Proton-Proton-Reaktion.“²⁵

4. Stand der Forschung

4.1 Forschungshistorie

Nach den ersten Fusionsexperimenten in den 1930er Jahren wurden in fast allen Industrieländern fusionsphysikalische Labors eingerichtet. Mitte der 1950er Jahre waren „Fusionsmaschinen“ in der Sowjetunion, Großbritannien, den Vereinigten Staaten, Frankreich, Deutschland und Japan im Einsatz. Experimente an diesen Maschinen haben das Verständnis der Wissenschaftler über den Fusionsprozess nach und nach verfeinert.

Ein großer Durchbruch gelang 1968 in der Sowjetunion. Die dortigen Forscher waren in der Lage, noch nie zuvor gelungene Temperaturniveaus und Plasmaeinschlusszeiten zu erreichen – zwei Schlüsselkriterien für die Ermöglichung der Fusion. Die sowjetische Maschine war eine ringförmige magnetische Einschlussvorrichtung namens Tokamak.

²⁴ Q13: „Lawson-Kriterium“

²⁵ Q2: „Kernfusion“

Von da an wurde der Tokamak zum dominierenden Konzept in der Fusionsforschung, wobei sich Tokamak-Installationen auf der ganzen Welt vervielfachten.²⁶

4.2 Erfolge und Grundlagen für heutige Forschungen

Fusionskraftwerke auf der ganzen Welt erzielten immer weiter Fortschritte, nachdem der Joint European Torus (JET), der seit 1983 in Großbritannien in Betrieb ist, 1991 die weltweit erste kontrollierte Freisetzung von Fusionsenergie erreichte. Der Tore Supra Tokamak aus Frankreich hält den Rekord für die längste Plasmadauer aller Tokamaks: 6 Minuten und 30 Sekunden. Japans JT-60 erreichte die höchsten Werte für ein Fusion-Triple-Produkt – Dichte, Temperatur und Einschlusszeit – aller bisherigen Anlagen. Und die Plasma-Temperatur von Kernfusionsanlagen in den Vereinigten Staaten hat Hunderte von Millionen Grad Celsius erreicht.²⁷



Abbildung 3: Welterster Fusionsreaktor (Russland)



Abbildung 4: Reaktorkammer von JET

4.3 Forschungsanlage ITER

Seit Ende 2007 beteiligen sich 35 Nationen an einem Mega-Projekt, das den Grundstein für die Energiegewinnung aus Kernfusion legen soll – ITER. Es ist heute „[...] eines der ehrgeizigsten Energieprojekte der Welt.“²⁸ Der riesige Fusionsreaktor vom Typ Tokamak, der in Südfrankreich aktuell noch im Bau ist, „[...] soll unter Beweis stellen, dass Fusionskraftwerke möglich sind.“²⁹ ITER wird der erste Fusionsreaktor sein, der Nettoenergie erzeugt – woraus man also mehr Energie erhält, als dafür benötigt wurde.

²⁶ vgl. Q8d: „60 Jahre Fortschritt“, ITER, <https://www.iter.org/sci/BeyondITER>, (Stand: 22.10.2022), übersetzt

²⁷ vgl. Q8d: „60 Jahre Fortschritt“

²⁸ Q8e: „Was ist ITER?“, ITER, <https://www.iter.org/proj/inafewlines>, (Stand: 26.10.2022), übersetzt

²⁹ Q14: „Simpler Ansatz für Kernfusion“, Kai Stoppel, ntv, 01.06.2022, (Link in Quellenverzeichnis), (Stand: 26.10.2022)

Die Idee für ITER kam erstmals 1985 auf. Seitdem haben Jahrzehnte der Fusionsforschung und Generationen von Fusionsanlagen sowie tausende Ingenieure und Wissenschaftler dem Design und den Planungen von ITER beigetragen.

ITER steht für International Thermonuclear Experimental Reactor und wird als gemeinsames Forschungsprojekt von den 27 EU-Staaten, dem Vereinigten Königreich, der Schweiz, USA, China, Südkorea, Japan, Russland und Indien entwickelt, gebaut und betrieben. Ziel dieses Projekts ist es, „[...] die Fusionswissenschaft voranzubringen und den Weg für die Fusionskraftwerke von morgen zu bereiten.“³⁰ An dem Forschungsreaktor sollen die integrierten Technologien, Materialien und physikalischen Systeme getestet werden, „[...] die für die kommerzielle Produktion von fusionsbasiertem Strom erforderlich sind.“³¹ An ITER können „Wissenschaftler [...] Plasmen unter ähnlichen Bedingungen wie in einem zukünftigen Kraftwerk untersuchen und Technologien wie Heizung, Steuerung, Diagnose, Kryotechnik und Fernwartung integriert [erforschen].“³² Das Projekt soll somit auch ein Testkraftwerk für zukünftige, energiebringende Kraftwerke sein.

Der Planung und Forschung für den ITER-Fusionsreaktor haben nicht nur seine Mitgliedstaaten beigetragen. Rund 20 weitere Reaktoren und deren Organisationen auf der ganzen Welt beteiligten sich durch ihre Forschungen an den Konzepten des ITER-Projekts und sind seit Jahrzehnten an den wissenschaftlichen Forschungen für die Fusionsenergie weltweit beteiligt. So trug zum Beispiel der koreanische KSTAR-Reaktor maßgeblich dazu bei, dass Systeme wie die Plasmakontrolle und Datenanalyse für ITER „[...] im Voraus auf KSTAR getestet und ihre Anpassungsfähigkeit und Betriebsfähigkeit für die Tokamak-Steuerung erfolgreich demonstriert [wurden].“³³ Auch heute noch wird KSTAR als Testumgebung z.B. für die Entwicklung der Elektronenheizung und den Hybridstromantrieb für den ITER-Reaktor genutzt. Die Eigenschaften des Testreaktors lieferten zudem wertvolle Daten für die Konstruktion und den Betrieb von ITER in Hinblick auf Qualitätskontrolle, Fertigung und Montage.

„Der Joint European Torus (JET) im Vereinigten Königreich ist der größte und leistungsstärkste Tokamak der Welt, der heute in Betrieb ist, und der Mittelpunkt der europäischen Fusionsforschung. Er wurde entwickelt, um die Fusion unter Bedingungen zu untersuchen, die denen eines Kraftwerks nahekommen, und ist das einzige Gerät, das mit dem Deuterium-Tritium-

³⁰ Q8e: „Was ist ITER?“

³¹ Q8e: „Was ist ITER?“

³² Q8f: „Was wird ITER tun?“, ITER, <https://www.iter.org/sci/goals>, (Stand: 26.10.2022), übersetzt

³³ Q8h: „Internationale Tokamakforschung“, ITER, <https://www.iter.org/sci/tkmresearch>, (Stand: 26.10.2022), übersetzt, (Wenn nicht anders angeben, Quelle für diesen und folgenden Absatz im Abschnitt)

Brennstoffgemisch umgehen kann, das in ITER (und in späteren Fusionskraftwerken) verwendet wird. In den letzten Jahren bestand die Hauptaufgabe des Programms darin, den Bau und Betrieb von ITER vorzubereiten, indem es als Testumgebung für ITER-Technologien und Plasmabetriebsszenarien fungierte.³⁴ Dabei gaben seine Forschungen Wissenschaftlern die Möglichkeit, Plasmaszenarien zu entwickeln, die den Vorgängen in ITER ähnlich sind. Daran konnten sie die Wechselwirkung des Plasmas mit den Reaktorwänden untersuchen sowie wertvolle Erkenntnisse zu Brennstoffen gewinnen.

„Der Bau der wissenschaftlichen ITER-Anlage in St-Paul-lez-Durance, Frankreich, ist seit 2010 im Gange. Parallel dazu haben die ITER-Mitglieder die Komponenten und Systeme der ITER-Maschinen und -Anlagen beschafft. Die [insgesamt über 10mio. Teile] kommen seit 2015 vor Ort an und im Jahr 2020 hat die ITER-Organisation offiziell mit der Maschinenmontage begonnen.“³⁵ Nach seiner Fertigstellung, wird der Tokamak über 23.000 Tonnen wiegen.³⁶ So viel wiegen drei Eifeltürme zusammen. Der Betrieb von ITER soll 2025 aufgenommen werden, „[...] neun Jahre später als geplant, die Baukosten sind von 5 auf 15 Milliarden Euro gestiegen“³⁷



Abbildung 5: ITER-Gelände im Bau

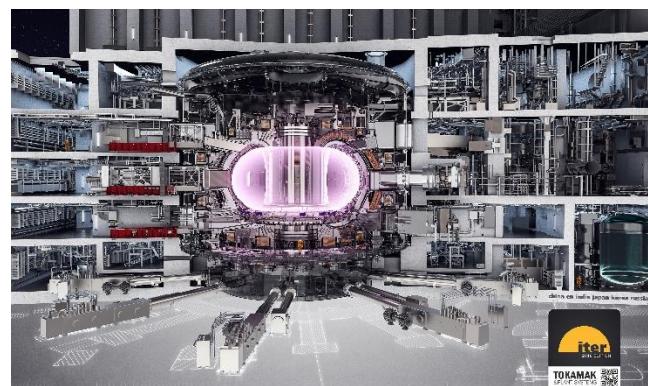


Abbildung 6: Reaktorquerschnitt von ITER

Nach der Montagephase, „[...] die die Montage der Kernmaschine sowie die Installation [der] erforderlichen Anlagensysteme umfasst“³⁸, erfolgt eine Inbetriebnahmephase, die die Funktionsstüchtigkeit aller verbauten Systeme sicherstellen soll. Danach, ca. Ende 2025, soll auch das

³⁴ Q8h: „Internationale Tokamakforschung“

³⁵ Q8f: „Was wird ITER tun?“

³⁶ vgl. Q12: „Großer Durchbruch“

³⁷ Q15 „Kernfusion“, Niels Boeing, Zeit Online, 06.06.2022, https://www.zeit.de/zeit-wissen/2022/03/kernfusion-physik-energieprobleme?utm_referrer=android-app%3A%2Fcom.google.android.googlequicksearchbox%2F, (Stand: 26.10.2022)

³⁸ Q8f: „Was wird ITER tun?“

nächste große Ziel von ITER erreicht werden: „First Plasma“. Es wird der Moment sein, an dem die riesige Maschine zum ersten Mal ein Fusionsplasma erzeugen wird. „So wird im Dezember 2025 der erste „kleine Stern“ im ITER Tokamak entstehen – genau 40 Jahre nachdem die Weltführer Gorbatschow und Reagan auf dem Genfer Supermacht-Gipfel im November 1985 eine umfassende internationale Fusionsinitiative in Gang gesetzt hatten.“^{39, 40}

4.4 Testanlage DEMO

ITER wird die von ihm erzeugte Energie jedoch nicht in Strom umwandeln. Als Forschungsrektor bereitet es den Weg für die Maschine, die dies als erstes können wird: DEMO. DEMO (DEMONstration Power Plant), als nächste Generation in der weltweiten Fusionsforschung, wird die Wissenschaft an den Punkt eines Prototyps für Fusionsreaktoren bringen.⁴¹ An diesem Demonstrationskraftwerk wird der (nahezu) kontinuierliche Betrieb eines stationären Kraftwerks untersucht werden.

Die Maschine nach ITER wird sich hauptsächlich mit den technologischen Fragen der Einspeisung von Fusionsenergie in das Stromnetz befassen. „Die Hauptziele für die DEMO-Phase der Fusionsforschung sind die [...] Untersuchung effizienter Energieerfassungssysteme, das Erreichen einer Leistungsabgabe im Q-Wert⁴²-Bereich von 30 bis 50 (im Gegensatz zu ITER 10) und die Herstellung von Tritium [im Reaktor]. DEMO wäre eine einfachere Maschine als ITER, mit weniger Diagnostik und einem Design, das mehr auf die Energiegewinnung als auf die Erforschung von Plasmaregimen abzielt.“⁴³

„Der Baubeginn [von DEMO] ist für die 2030er und der Betrieb für die 2040er Jahre vorgesehen.“⁴⁴

³⁹ Q8g: „Erstes Plasma: 2025“, ITER, 08.2016, <https://www.iter.org/mag/9/65>, (Stand: 26.10.2022), übersetzt

⁴⁰ Weitere Bilder zu ITER: Siehe Bildanhang

⁴¹ vgl. Q8i: „Nach ITER“, ITER, <https://www.iter.org/sci/iterandbeyond>, (Stand: 26.10.2022), übersetzt

⁴² D4 „Q-Wert“: Der Q-Wert ist der ‚Energie-Rendite-Wert.‘ Liegt dieser z.B. bei $Q=2$, so erhält man durch eine Fusionsreaktion die doppelte Menge Energie, als die Menge Energie, die man für diese Fusion verbrauchen musste.

⁴³ Q8i: „Nach ITER“

⁴⁴ Q8i: „Nach ITER“

5. Fusionsanlagen und technische Herangehensweisen

5.1 Tokamak

Wie bereits in Punkt 2.2 erwähnt, ist der Tokamak das bekannteste Konzept für Kernfusionsreaktoren. Der Tokamak besteht im Wesentlichen aus einer Vakuumkammer, in der bei ca. 2,5 Bar das 100-Millionen-Grad heiße Plasma, bestehend aus einem gleichen Teil von Deuterium und Tritium⁴⁵, fließt. In dieser Kammer findet die Fusion statt.

Die Vakuumkammer ist wie ein Donut geformt. Außen um die Kammer sitzen die Magnetspulen als Kammerwand und inmitten dieses Torus befindet sich der Transformator. Das Plasma wird durch die ringförmigen Magnetspulen und das, durch den Transformator erzeugte, im Plasma liegende Magnetfeld kontrolliert.⁴⁶ Diese beiden Magnetfeldkomponenten tragen dazu bei, dass sich die Plasmateilchen kontinuierlich und der Form des Donuts entlang schrauben- bzw. helixförmig in der Plasmakammer bewegen.

Das Plasma berührt dadurch, wie weiter vorne erwähnt, nicht die Reaktorwand. Denn durch die erzeugten Magnetfelder lässt sich das Plasma insoweit kontrollieren, dass es in dieser Kammer „schwebt“ und keine Wände berührt. Die Deuterium- und Tritium-Teilchen bewegen sich genau entlang der Magnetfeldlinien.

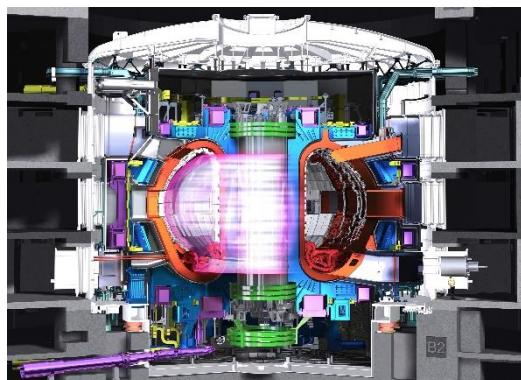


Abbildung 7: Tokamak-Querschnitt



Abbildung 8: Reaktorquerschnitt von ITER (siehe Person in Modell als Größenvergleich)

In Punkt 3.3 wurde bereits erwähnt, dass sich um den Plasmakessel eine Lithiumschicht befindet. Sie dient nicht nur der Erzeugung vom seltenen Tritium. Die Neutronen, die bei der

⁴⁵ vgl. Q2: „Kernfusion“

⁴⁶ vgl. Q16: „Wie arbeitet eine Fusionsanlage?“, Terra X (Video), ZDF, 10.01.2022, <https://www.zdf.de/dokumentation/terra-x/wie-arbeitet-eine-fusionsanlage-creative-commons-clip-100.html>

Fusionsreaktion entstehen und danach in diese Schicht abgeführt werden, bringen die extrem hohe Energie mit, die aus der Lithiumschicht heraus weiter zur Energiegewinnung genutzt wird. Die Energie bzw. Wärme aus der Kernfusion wird also durch die entstehenden Neutronen, die, da sie nicht geladen sind, dem Magnetfeld im Plasma entkommen, durch die Lithiumschicht an Wasserbehälter abgeben. Das Wasser heizt sich auf und es entsteht heißer Wasserdampf, der Turbinen dazu bringt, brauchbare Energie zu erzeugen.

5.2 Stellarator

Doch das Tokamakkonzept bringt einen Nachteil mit sich. „Das Magnetfeld kann nur solange aufrechterhalten werden, wie der Transformator von einem Strom ansteigender Stärke durchflossen wird. Weil man den Strom aber nicht unendlich steigern kann, muss der Transformator immer wieder aus- und angeschaltet werden. Daher kann dieser Reaktortyp nicht dauerhaft, sondern nur mit Unterbrechungen betrieben werden.“⁴⁷

Am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Greifswald hat man den weltgrößten Stellarator-Reaktortyp ‚Wendelstein 7-x‘ entwickelt. Durch seine unregelmäßigen und äußerst komplex geformten Magnetspulen kommt der Stellarator ohne Transformator aus. Dies ermöglicht dem nach 15 Jahren Bauzeit fertiggestelltem Wendelstein 7-x im Gegensatz zum Tokamak-Konzept einen Dauerbetrieb. „Elementar für den wirtschaftlichen Betrieb eines Kraftwerks.“⁴⁸

5.3 Trägheitseinschluss mit Lasern

Außer dem magnetischen Plasmaeinschluss gibt es noch einen weiteren Ansatz für Fusionsenergie. Bei dem Trägheitseinschluss beschießt man ein sehr stark heruntergekühltes und festes Kugelchen (sog. Fusions-Target), bestehend aus einem Deuterium-Tritium-Gemisch, möglichst homogen von allen Seiten mit sehr energiestarken Lasern.

Im National Ignition Facility (NIF) in Kalifornien erforscht man diese Methode mit 192 Lasern in einer riesigen Kugel mit einem Durchmesser von 15-20 Metern. Das Fusions-Target ist dabei nur stecknadelkopfgroß und passt auf eine Fingerspitze. Es muss genau im Zentrum der Kugel sein und wird dann von allen Seiten bestrahlt.

Die Oberfläche des Kugelchens absorbiert das hochenergiereiche Laserlicht und erhitzt sich so stark, dass sich ein Plasma bildet. Alles, was sehr heiß ist, und somit auch das Plasma, will sich

⁴⁷ Q16: „Wie arbeitet eine Fusionsanlage?“

⁴⁸ Q16: „Wie arbeitet eine Fusionsanlage?“

ausdehnen. Wenn etwas sehr schnell plötzlich ausgestoßen wird oder sich ausdehnt, so wie bei einer Rakete, kommt es zu einem Rückstoß. Dieses Phänomen tritt auch bei dem Kugelchen auf. Der Rückstoß richtet sich an jeder Stelle radial nach innen, sodass eine sog. „Verdichtungswelle“ zu einer Kompression des Targets führt.

Bei der Kompression des Plasmas entstehen sehr hohe Temperaturen. Für eine sehr kurze Zeit bleibt das Target aufgrund seiner natürlichen Trägheit komprimiert, bevor es sich wieder von selbst ausdehnt. Ist diese kurze Zeit lang genug, sodass das Lawson-Kriterium (s. 3.5) erfüllt wird, und ist die Temperatur ausreichend hoch, sodass der Wirkungsquerschnitt (D2, S. 4) für eine Fusion erreicht ist (bei ca. 10-60keV; Temperaturen, die bei der Kompression möglich sind), erhält man in dieser kurzen Zeit dennoch genug D-T-Fusionsreaktionen, sodass auch diese Methode zur Energiegewinnung möglich wäre.

Auf der Welt gibt es, neben der NIF, ungefähr zwei weitere Maschinen, die dies können. Diese schießen jedoch nur ca. 2-3 Mal pro Tag. Bei den zahlreichen Experimenten konnte bisher noch nie mehr Energie gewonnen werden, als man reingesteckt hat. Um die Trägheitsfusion als Energiequelle wettbewerbsfähig als Kraftwerk nutzen zu können, müssten die Reaktoren zudem ungefähr 10 Mal pro Sekunde schießen. Außerdem muss das Target dabei jedes Mal genau im Zentrum sitzen, damit es exakt von allen Seiten bestrahlt werden kann. Bis diese Gegebenheiten erfüllt sind, ist noch sehr viel Forschungsarbeit zu leisten und diese Methode ist weit hinter dem Magneteinschluss, weshalb sich dieser Ansatz zur Energiegewinnung wohl nicht kommerziell durchsetzen wird.⁴⁹

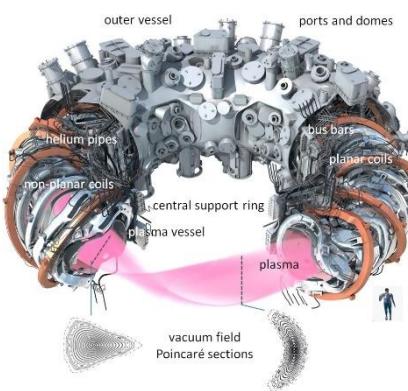


Abbildung 9: Stellarator

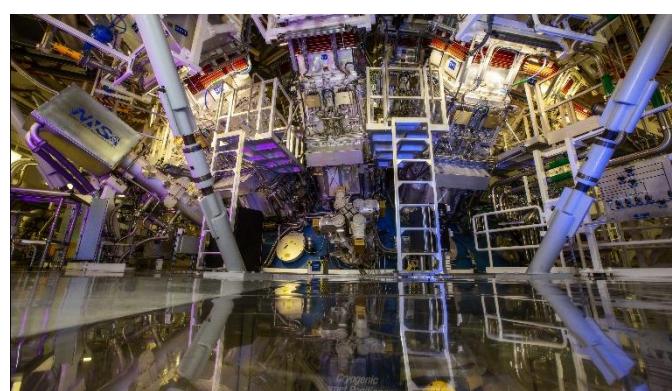


Abbildung 10: National Ignition Facility

⁴⁹ vgl. Q6: „Kernfusion - Energiequelle der Zukunft?“, (Quelle für gesamten Abschnitt)

5.4 Energiegewinn

Wie bereits zuvor erwähnt, verlassen die Neutronen nach der Fusion sofort das Plasma, [...] „werden vom Magnetfeld kaum beeinflusst und gelangen in das Blanket (Decke/Hülle im Reaktor), wo sie zunächst durch Stöße ihre Energie als nutzbare Wärme abgeben und danach zum Erhitzen je eines Tritiumatoms dienen sollen. Die thermische Energie kann dann wie in jedem konventionellen Kraftwerk über Wärmetauscher Wasserdampf erzeugen, der wiederum Dampfturbinen mit angekoppelten Stromgeneratoren antreibt.“⁵⁰ „[...] Ihre kinetische Energie von 14,1 MeV dient dann der Energiegewinnung“.⁵¹

Mit Deuterium-Tritium-Plasmen würde man nach heutigem Forschungsstand 10 Mal so viel Energie erhalten, im Vergleich zu der Energiemenge, die man dafür aufgewendet hat.⁵² Wissenschaftler gehen sogar davon aus, dass es in ferner Zukunft möglich wird, das 50-fache an Energie zu erhalten.

Sobald die Kernfusion reaktorfähig ist, würde man mit nur zwei Litern Wasser und ca. 220g Gestein den kompletten jährlichen Stromverbrauch einer ganzen Familie decken können.⁵³

Welche weiteren Vorteile die Kernfusion in Bezug auf den Energiegewinn gegenüber gegenwärtigen Energiequellen hat, wird weiter hinten genauer aufgeführt.

6. Kernfusion im Vergleich zu heutigen Energiequellen

6.1 Nachteile von gegenwärtigen Kraftwerken

Die Energie, die wir zum Leben brauchen können wir heutzutage auf ganz unterschiedliche Weise gewinnen: Mit fossilen Brennstoffen, Kernspaltung oder mit Photovoltaik. Doch sie haben alle auch ihre Nachteile. Fossile Brennstoffe sind nicht nur schädlich für die Umwelt sondern auch hoch giftig. Die Abfallprodukte der Kernspaltung strahlen radioaktiv und verursachen auch Umweltschäden. Zudem ist hierbei die Gefahr der Kernschmelze gegeben, die verheerende Folgen haben kann. Und für die Energie aus Sonnenstrahlen gibt es bisher nicht genug

⁵⁰ Q17: „Kernfusionsreaktor“, Wikipedia, 23.05.2022, <https://de.wikipedia.org/wiki/Kernfusionsreaktor>, (Stand: 25.10.2022)

⁵¹ Q13: „Lawson-Kriterium“

⁵² vgl. Q6: „Kernfusion - Energiequelle der Zukunft?“

⁵³ vgl. Q18: „Kernfusion - Stand und Perspektiven“, Isabella Milch, VDE ETG, 21.01.2005, <https://www.vde.com/de/etg/arbeitsgebiete/informationen/kernfusion>, (Stand: 25.10.2022)

Batterien, um diese zu speichern.⁵⁴ Aber auch die Windkraft hat ihre Nachteile. Wind ist nicht konstant verfügbar und der Bau von neuen Windkraftanlagen ist kostenintensiv.⁵⁵



Abbildung 11: Kohlekraftwerk



Abbildung 12: Atomkraftwerk

6.2 Vorteile der Kernfusion

Die Kernfusion hingegen ist nicht nur komplett klimaneutral,⁵⁶ sondern liefert, im Gegensatz zu gegenwärtigen Energiequellen, deutlich mehr Energie. Bei gleicher Masse setzt „die kontrollierte Verschmelzung von Atomen [...] fast vier Millionen Mal mehr Energie frei als eine chemische Reaktion wie das Verbrennen von Kohle, Öl oder Gas und viermal so viel wie Kernspaltungsreaktionen.“⁵⁷

Hinzu kommt die fast unendliche Menge an Fusionsbrennstoff. „Deuterium kann aus allen Formen von Wasser destilliert werden [und Tritium wird aus den Reaktionsprodukten im Reaktor hergestellt]. [Die] Lithiumvorräte, [die für die ‚Tritiumzüchtung‘ notwendig sind,] auf der Erde würden den Betrieb von Fusionskraftwerken für mehr als 1.000 Jahre ermöglichen, während Lithiumvorkommen im Meer den Bedarf für Millionen von Jahren decken würden.“⁵⁸ „Während ein 1000-MW-Kohlekraftwerk 2,7 Millionen Tonnen Kohle pro Jahr benötigt, benötigt ein Fusionskraftwerk [...] nur 250 Kilo Brennstoff pro Jahr. [...] Im Plasma sind zu jedem Zeitpunkt nur wenige Gramm Brennstoff vorhanden. Dies macht einen Fusionsreaktor unglaublich sparsam im Brennstoffverbrauch und verleiht der Anlage auch wichtige Sicherheitsvorteile.“⁵⁹

⁵⁴ vgl. Q4: „Energie der Zukunft oder kompletter Reinfall? - Fusionsenergie erklärt“

⁵⁵ vgl. Q19: „Vorteile und Nachteile einer Windkraftanlage“, ENERGIEVOLL, 19.04.2022, <https://www.badenova.de/blog/vorteile-und-nachteile-einer-windkraftanlage/>, (Stand: 28.10.2022)

⁵⁶ vgl. Q20: „Klimaneutrale Energieproduktion: Sind Kernfusionsreaktoren im Kommen?“, GEO, 04.11.2021, <https://www.geo.de/wissen/ist-die-kernfusion-im-kommen---30893408.html>, (Stand: 28.10.2022)

⁵⁷ Q8j: „Vorteile der Fusion“, ITER, <https://www.iter.org/sci/Fusion>, (Stand: 28.10.2022), übersetzt

⁵⁸ Q8j: „Vorteile der Fusion“

⁵⁹ Q8a: „Betankung der Fusionsreaktion“

„Ein Gramm Brennstoff könnte in einem Kraftwerk 90.000 Kilowattstunden Energie erzeugen – die Verbrennungswärme von 11 Tonnen Kohle!“⁶⁰

6.3 Ist Kernfusion gefährlich?

„[...] Neben der Tatsache, dass ein Fusionsreaktor eine nahezu unerschöpfliche Energiequelle mit einem sehr hohen Energiepotenzial darstellt, ist ein Fusionsreaktor auch ungefährlich.“⁶¹ Kernfusionsreaktoren produzieren z.B. keine langlebigen radioaktiven Abfälle. Man muss sich keine Sorgen umendlager für Stoffe machen, die bei der Kernfusion entstehen.

Aber auch „ein Atomunfall vom Typ Fukushima ist in einer Tokamak-Fusionsanlage nicht möglich. [...] Wenn eine Störung auftritt, kühlt das Plasma innerhalb von Sekunden ab und die Reaktion stoppt. Die jeweils im [Reaktorkessel] vorhandene Kraftstoffmenge reicht nur für wenige Sekunden und es besteht keine Gefahr einer Kettenreaktion.“⁶²

7. Fazit

Diese Hausarbeit sollte einen kleinen Blick in die Zukunft der Energiegewinnung ermöglichen. Von den physikalischen Voraussetzungen bis hin zur technischen Herangehensweise wurde umfangreich erklärt, wie Kernfusion als Energiequelle umsetzbar ist und wie weit die Forschung damit ist.

Die Kernfusion als nahezu unendliche, kostengünstige und klimaneutrale Quelle der Energie könnte „[...] einen positiven Beitrag zu den Herausforderungen der Ressourcenverfügbarkeit, der Verringerung der Kohlenstoffemissionen sowie der Entsorgung von Spaltungsabfällen und Sicherheitsfragen leisten.“⁶³ „Das Energiepotential der Fusionsreaktion ist vom schieren Ausmaß her allen anderen Energiequellen, die wir auf der Erde kennen, überlegen.“⁶⁴

„Über DEMO hinaus wäre der letzte Schritt zur Erzeugung von Fusionsenergie der Bau eines Prototypreaktors, der vollständig optimiert ist, um wettbewerbsfähig Strom zu erzeugen. Der Zeitplan für einen solchen Prototyp hängt stark vom politischen Willen ab, dieses Stadium zu

⁶⁰ Q21: „Was ist Kernfusion?“, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik,
<https://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/fusion21/kernfusion/index>, (Stand: 28.10.2022)

⁶¹ Q1: „Warum Fusionskraft die Welt retten kann“

⁶² Q8j: „Vorteile der Fusion“

⁶³ Q8j: „Vorteile der Fusion“

⁶⁴ Q8c: „Damit es funktioniert“

erreichen, aber die meisten Prognosen verorten diese Phase der Entwicklung der Fusionsenergie auf die Mitte des Jahrhunderts.“⁶⁵

8. Quellen

8.1 Literaturverzeichnis

Q11: Günther Kirchberger: „Knaurs Neues Jugendlexikon“, Knaur Verlag, München 1998, S. 347

8.2 Internetverzeichnis

Q1: „Warum Fusionskraft die Welt retten kann“, 100SekundenPhysik, YouTube, 02.06.2019, <https://www.youtube.com/watch?v=fBJ7MW2daPU>, [Link](#)

Q2: „Kernfusion“, Wikipedia, 17.01.2022, <https://de.wikipedia.org/wiki/Kernfusion>, (Stand: 27.09.2022), [Link](#)

Q3: „Grundlagen der Kernfusion“, Deutsche Physikalische Gesellschaft, <https://www.dpg-physik.de/vereinigungen/fachlich/smuk/fvp/weiterfuehrende-informationen/grundlagen-der-kernfusion>, (Stand: 08.10.2022), [Link](#)

Q4: „Energie der Zukunft oder kompletter Reinfall? - Fusionsenergie erklärt“, Dinge Erklärt – Kurzgesagt, YouTube, 26.08.2020, <https://www.youtube.com/watch?v=lj4IC70kDIU>, [Link](#)

Q5: „Pro Sekunde vier Millionen Tonnen Energie“, Dirk Lorenzen, Deutschlandfunk, 15.06.2015, <https://www.deutschlandfunk.de/astronomie-pro-sekunde-vier-millionen-tonnen-energie-100.html>, (Stand: 27.09.2022), [Link](#)

Q6: „Kernfusion - Energiequelle der Zukunft?“, M. C. Kaluza, in *Öffentliche Samstagsvorlesung (Wintersemester 2020/21)*, 05.12.2020, https://www.db-thueringen.de/receive/dbt_mods_00047287, [Link](#)

Q7: „Kernspaltung und Kernfusion“, LEIFIphysik, <https://www.leifiphysik.de/kern-teilchenphysik/kernspaltung-und-kernfusion/grundwissen/kernfusion>, (Stand: 11.10.2022), [Link](#)

Q8a: „Betankung der Fusionsreaktion“, ITER, <https://www.iter.org/sci/fusionfuels>, (Stand: 30.09.2022), übersetzt, [Link](#)

Q8b: „Erreichen von 150.000.000 °C“, ITER, <https://www.iter.org/sci/plasmaheating>, (Stand: 12.10.2022), übersetzt, [Link](#)

Q8c: „Damit es funktioniert“, ITER, <https://www.iter.org/sci/makingitwork>, (Stand: 12.10.2022), übersetzt, [Link](#)

Q8d: „60 Jahre Fortschritt“, ITER, <https://www.iter.org/sci/BeyondITER>, (Stand: 22.10.2022), übersetzt, [Link](#)

Q8e: „Was ist ITER?“, ITER, <https://www.iter.org/proj/inafewlines>, (Stand: 26.10.2022), übersetzt, [Link](#)

⁶⁵ Q8i: „Nach ITER“

- Q8f: „Was wird ITER tun?“, ITER, <https://www.iter.org/sci/goals>, (Stand: 26.10.2022), übersetzt, [Link](#)
- Q8g: „Erstes Plasma: 2025“, ITER, 08.2016, <https://www.iter.org/mag/9/65>, (Stand: 26.10.2022), übersetzt, [Link](#)
- Q8h: „Internationale Tokamakforschung“, ITER, <https://www.iter.org/sci/tkmkresearch>, (Stand: 26.10.2022), übersetzt, [Link](#)
- Q8i: „Nach ITER“, ITER, <https://www.iter.org/sci/iterandbeyond>, (Stand: 26.10.2022), übersetzt, [Link](#)
- Q8j: „Vorteile der Fusion“, ITER, <https://www.iter.org/sci/Fusion>, (Stand: 28.10.2022), übersetzt, [Link](#)
- Q9: „Kernfusion“, Dr. Rüdiger Paschotta, RP-Energie-Lexikon, 10.07.2011, <https://www.energie-lexikon.info/kernfusion.html>, (Stand: 11.10.2022), [Link](#)
- Q10: „Wie man perfekte Fusionsbedingungen erzeugt“, EUROfusion, <https://www.euro-fusion.org/de/fusion/bedingungen-fuer-die-kernfusion/#:~:text=Einschlusszeit-,Temperatur,an%20den%20Brennstoff%20abgeben%20k%C3%B6nnen.>, (Stand: 21.10.2022), [Link](#)
- Q12: „Großer Durchbruch“, Ashish Dangwal, EurAsian Times, 04.06.2022, https://eurasiantimes.com/big-breakthrough-scientists-at-thermonuclear-reactor-iter-replicate-suns/#amp_agfa_csa=49326498&_ct=1654368262653&_tf=Von%20%251%24s&aoh=16543623401126&csi=0&referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com&share=https%3A%2F%2Feurasiantimes.com%2Fbig-breakthrough-scientists-at-thermonuclear-reactor-iter-replicate-suns%2F, (Stand: 12.10.2022), [Link](#)
- Q13: „Lawson-Kriterium“, Wikipedia, 27.11.2019, <https://de.wikipedia.org/wiki/Lawson-Kriterium>, (Stand: 24.10.2022), [Link](#)
- Q14: „Simpler Ansatz für Kernfusion“, Kai Stoppel, ntv, 01.06.2022, https://www.n-tv.de/wissen/Saubere-Energie-Bringt-dieser-Krebs-den-Durchbruch-fuer-die-kontrollierte-Kernfusion-article23335725.html#amp_agfa_csa=49326498&_ct=1653284090470&_tf=Von%20%251%24s&aoh=16532831185755&csi=0&referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com&share=https%3A%2F%2Fwww.n-tv.de%2Fwissen%2FLoesst-dieser-Krebs-all-unsere-Energie-probleme-article23335725.html, (Stand: 26.10.2022), [Link](#)
- Q15 „Kernfusion“, Niels Boeing, Zeit Online, 06.06.2022, https://www.zeit.de/zeit-wissen/2022/03/kernfusion-physik-energieprobleme?utm_referrer=android-app%3A%2F%2Fcom.google.android.googlequicksearchbox%2F, (Stand: 26.10.2022), [Link](#)
- Q16: „Wie arbeitet eine Fusionsanlage?“, Terra X (Video), ZDF, 10.01.2022, <https://www.zdf.de/dokumentation/terra-x/wie-arbeitet-eine-fusionsanlage-creative-commons-clip-100.html>, [Link](#)
- Q17: „Kernfusionsreaktor“, Wikipedia, 23.05.2022, <https://de.wikipedia.org/wiki/Kernfusionsreaktor>, (Stand: 25.10.2022), [Link](#)
- Q18: „Kernfusion - Stand und Perspektiven“, Isabella Milch, VDE ETG, 21.01.2005, <https://www.vde.com/de/etg/arbeitgebiete/informationen/kernfusion>, (Stand: 25.10.2022), [Link](#)
- Q19: „Vorteile und Nachteile einer Windkraftanlage“, ENERGIEVOLL, 19.04.2022, <https://www.badenova.de/blog/vorteile-und-nachteile-einer-windkraftanlage/>, (Stand: 28.10.2022), [Link](#)
- Q20: „Klimaneutrale Energieproduktion: Sind Kernfusionsreaktoren im Kommen?“, GEO, 04.11.2021, <https://www.geo.de/wissen/ist-die-kernfusion-im-kommen---30893408.html>, (Stand: 28.10.2022), [Link](#)
- Q21: „Was ist Kernfusion?“, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, <https://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/fusion21/kernfusion/index>, (Stand: 28.10.2022), [Link](#)

8.3 Abbildungsverzeichnis

Titelbild

Quelle: Pexels - (<https://pixabay.com/de/photos/kosmos-milchstra%C3%9Fe-nacht-himmel-1853491/>)
[Link](#)

Abbildung 1: Deuterium-Tritium-Reaktion

Quelle: Wikipedia - (<https://de.wikipedia.org/wiki/Kernfusion>) [Link](#)

Abbildung 2: Fusion grafisch dargestellt

Quelle: European Scientist - (<https://www.europeanscientist.com/de/energie-de/bei-17-millionen-c-fusionsreaktor-east-haelt-plasma-17-minuten-lang-aufrecht/>) [Link](#)

Abbildung 3: Welterster Fusionsreaktor (Russland)

Quelle: ITER - (<https://www.iter.org/sci/BeyondITER>) [Link](#)

Abbildung 4: Reaktorkammer von JET

Quelle: ITER - (<https://www.iter.org/sci/tkmkresearch>) [Link](#)

Abbildung 5: ITER-Reaktor im Bau

Quelle: ITER - (<https://www.iter.org/org/iterinfrance>) [Link](#)

Abbildung 6: Reaktorquerschnitt von ITER

Quelle: ITER - (https://www.iter.org/doc/www/content/com/Lists/WebText_2014/Attachments/273/tkmplant_2016_72dpi.jpg) [Link](#)

Abbildung 7: Tokamak-Querschnitt

Quelle: ITER - (<https://www.iter.org/proj/inafewlines>) [Link](#)

Abbildung 8: Reaktorquerschnitt von ITER

Quelle: Wikipedia - ([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ITER_Exhibit_\(01810402\)_\(_12219071813\)_\(_cropped\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ITER_Exhibit_(01810402)_(_12219071813)_(_cropped).jpg)) [Link](#)

Abbildung 9: Stellerator

Quelle: Wikipedia - (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schematic_diagram_of_Wendelstein_7-X.jpg) [Link](#)

Abbildung 10: National Ignition Facility

Quelle: PHYS.ORG - (<https://phys.org/news/2018-07-national-ignition-facility-laser-energy.html>)
[Link](#)

Abbildung 11: Kohlekraftwerk

Quelle: goClimate - (<https://www.goclimate.de/glossar/kohlekraftwerk/>) [Link](#)

Abbildung 12: Atomkraftwerk

Quelle: FOCUS Online - (https://www.focus.de/politik/deutschland/philippsburg-2-in-baden-wuerttemberg-akw-im-laendle-geht-vom-netz-dafuer-mehr-atom-und-kohlestrom-aus-dem-ausland_id_11498343.html) [Link](#)

8.4 Definitionen

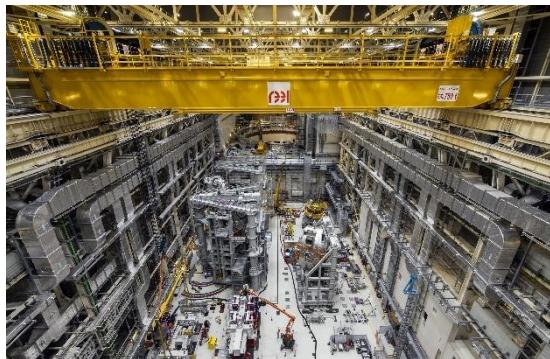
D1 „Thermonukleare Prozesse“: „Energie der Zukunft oder kompletter Reinfall? - Fusionsenergie erklärt“, Dinge Erklärt – Kurzgesagt, YouTube, 26.08.2020, <https://www.youtube.com/watch?v=lj4-IC70kDIU>, [Link](#)

D2 „Wirkungsquerschnitt“: „Wirkungsquerschnitt“, Wikipedia, 10.09.2022, <https://de.wikipedia.org/wiki/Wirkungsquerschnitt>, (Stand: 11.10.2022), [Link](#)

D3 „Schwache Wechselwirkung“: „Schwache Wechselwirkung“, Wikipedia, 21.02.2022, https://de.wikipedia.org/wiki/Schwache_Wechselwirkung, (Stand: 11.10.2022), [Link](#)

D4 „Q-Wert“: „Was wird ITER tun?“, ITER, <https://www.iter.org/sci/goals>, (Stand: 26.10.2022), übersetzt, [Link](#)

9. Bildanhang



Anhang 1: Reaktorhalle ITER
(Quelle: iter.org)



Anhang 2: Montage von Kammer-Modul in
ITER (Quelle: iter.org)

10. Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt habe.

Die aus fremden Quellen übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Ich bin mir bewusst, dass eine unwahre Erklärung rechtliche Folgen haben kann.⁶⁶

Herborn, 04.11.2022

Ort, Datum



Unterschrift

⁶⁶ Dieser Text entstammt den Vorgaben der Universität Jena (<https://www.orga.uni-jena.de/wofmedia/dokumente/bachelorarbeit/eidesstattliche-erklaerung.pdf>, [Link](#))



Energiegewinnung durch kontrollierte Fusion von Stoffen

© 2022 Emanuel Förder