



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften

 acatech
DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

 UNION
DER DEUTSCHEN AKADEMIEN
DER WISSENSCHAFTEN

September 2024

Kurz erklärt!

Ist Kernfusion eine Energiequelle der Zukunft?

Sven Wurbs | Sonja Dehlwes | Andrea Lübke | Cyril Stephanos | Manfred Fishedick | Hans-Martin Henning | Andreas Löschel | Ellen Matthies | Karen Pittel | Jürgen Renn | Dirk Uwe Sauer | Indra Spiecker genannt Döhmann

Kurz erklärt!

Wenn bei der Kernfusion leichte Atomkerne miteinander verschmelzen, wird Energie freigesetzt. Ziel der Kernfusionsforschung ist es, diesen Prozess für die Stromerzeugung nutzbar zu machen. Geforscht wird an zwei Grundprinzipien, dem magnetischen Einschluss, auch **Magnetfusion** genannt, und der **Trägheitsfusion**, zu der unter anderem die **Laserfusion** zählt.

High-Tech-Ansatz: Damit es zur Kernfusion kommt, sind sehr hohe Temperaturen und teils hohe Drücke nötig. Das stellt besondere Anforderungen an die Materialien, die in den technisch anspruchsvollen Anlagen eingesetzt werden.

Technologie im frühen Entwicklungsstadium: Bei der Magnet- und der Trägheitsfusion bewegen sich die Arbeiten oft noch im Bereich der Grundlagenforschung. Einzelne Prozessschritte oder Bauteile werden aber auch der angewandten Forschung zugeordnet.

Kraftwerk möglicherweise in 20 bis 25 Jahren: Weltweit existieren bisher verschiedene Forschungsanlagen. Einen funktionierenden Prototyp für ein Kraftwerk gibt es bisher nicht. Viele Fachleute rechnen mit einem stromeinspeisenden Kraftwerk frühestens in 20 bis 25 Jahren.

Klimafreundliche Technologie: Gelingt eine wirtschaftlich tragfähige Umsetzung, könnte die Kernfusion langfristig einen Beitrag zu einer klimafreundlichen Energieversorgung leisten, da bei der Fusionsreaktion keine Treibhausgase entstehen. Geforscht wird zudem daran, die benötigte Brennstoffe zumindest in Teilen direkt vor Ort zu erzeugen.

Inhalt

Was ist Kernfusion?	3
Wie unterscheiden sich Kernfusion und Kernspaltung?	5
Welche Konzepte für Kernfusionskraftwerke gibt es?	7
Magnetfusion	7
Trägheitsfusion	8
Welche Brennstoffe kommen bei der Kernfusion zur Anwendung?	10
Wie hat sich die Kernfusion historisch entwickelt?	11
Welche Fortschritte hat die Kernfusionsforschung in letzter Zeit erreicht? ...	14
Kann die Kernfusion dabei helfen, die Klimaziele zu erreichen?	15
Literatur	17
Akademienprojekt	20

Was ist Kernfusion?

Bei der Kernfusion¹ **verschmelzen Atomkerne miteinander**. Als Ergebnis der Fusionsreaktion entsteht ein neues Atom mit einer höheren Anzahl von Teilchen (Protonen und Neutronen) im Kern (siehe Abbildung 1), also ein anderes chemisches Element. Die Masse eines Atomkerns ist geringer als die zusammengenommenen Massen der einzelnen Teilchen darin. Die Massendifferenz wird entsprechend der Albert Einstein'schen Formel „ $E = m \cdot c^2$ “ zu Energie. Wie groß dieser Massenunterschied und damit die freigesetzte Energie ist, hängt jeweils von den beteiligten Elementen beziehungsweise Teilchen ab. Oft wird die Energie in Form von **Bewegungsenergie** (kinetische Energie) von Neutronen abgegeben.

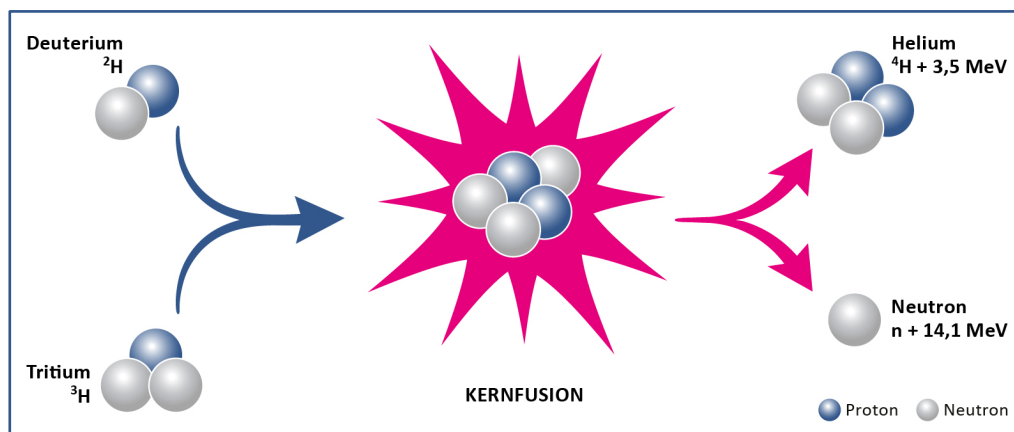


Abbildung 1: Prinzip der Kernfusion am Beispiel der Bildung von Helium (${}^4\text{He}$) aus den Wasserstoffisotopen Deuterium (${}^2\text{H}$) und Tritium (${}^3\text{H}$), wobei auch ein Neutron (n) mit einer charakteristischen kinetischen Energie von 14,1 MeV (Megaelektronenvolt) frei wird. Das Alphateilchen (Helium) trägt 3,5 MeV kinetische Energie, welches das Plasma zusätzlich heizt und somit die Fusionsprozesse beschleunigt. Quelle: eigene Darstellung.

Wie Atomkerne fusionieren, lässt sich am Inneren der Sonne veranschaulichen: Bei 15 Millionen Grad Celsius und einem Druck von 100 Milliarden bar verschmelzen dort stetig Wasserstoffatome zu Heliumatomen und setzen auf diese Weise enorme Mengen an Energie frei [1]. Das Ziel der Fusionsforschung besteht darin, dieses Prinzip auf der Erde technisch nachzubilden und zur Energiegewinnung einzusetzen.

Erste Herausforderung dabei: Für eine erfolgreiche Kernfusionsreaktion müssen zunächst die Abstoßungskräfte zwischen den Atomkernen überwunden werden, die sich aus den jeweils positiven Ladungen der Atomkerne ergeben (Coulomb-Barriere). Eine Kernfusion benötigt somit Energie, um zu starten. Weil die im Sonneninneren vorherrschenden Druckverhältnisse auf der Erde nicht zu erreichen sind, müssen als Ausgleich höhere Temperaturen von **etwa 100 bis 150 Millionen Grad Celsius** erreicht werden. Es bildet sich dann ein sogenanntes Plasma, in dem die Atome in ionisierter Form vorliegen und so ihre Elektronen frei beweglich sind. Neben fest, flüssig und gasförmig wird der Plasmazustand häufig als vierter Aggregatzustand bezeichnet. In dem so heißen Plasma erreichen die Atomkerne so hohe Geschwindigkeiten, dass sie die Abstoßungskräfte zwischen ihren gleichgeladenen Protonen überwinden können. Sie

- 1 Statt von Kernfusion wird in der deutschsprachigen Forschungscommunity teilweise von „Fusion“ oder „Fusionsenergie“ gesprochen. Dies zielt unter anderem darauf, die Technologie besser von der Kernspaltung, also von Atomkraftwerken abzugrenzen. In diesem Papier wird hingegen das Wort „Kernfusion“ genutzt, weil die Grundlage der Technologie physikalische Wechselwirkungen in den Atomkernen sind. Hinzu kommt, dass in der allgemeinen öffentlichen Diskussion der Begriff „Kernfusion“ geläufiger ist. Bei zusammengesetzten Begriffen wird für eine bessere Lesbarkeit allerdings meist die Kurzform „Fusion“ verwendet.
- 3 Die Einschlusszeit gibt an, in welcher Zeit das Plasma seinen Energieinhalt an seine Umgebung abgibt. Bei der Trägheitsfusion wird durch die deutlich höhere Plasmadichte bei der Fusionsreaktion (circa 10^{25} Teilchen/cm³) eine viel kürzere Energieeinschlusszeit (10^{-9} Sekunden) benötigt als bei der Magnetfusion. Dort beträgt die Einschlusszeit mindestens 1 Sekunde bei einer Plasmadichte von 10^{14} Teilchen/cm³. [5]

ziehen sich nach dem Überschreiten der Coulomb-Barriere an und verschmelzen anschließend zu einem neuen Element. [2; 3; 4]

Damit sich die Kernfusionsreaktion selbst trägt, also so viel Energie freigesetzt wird, dass die zum Start der Fusionsreaktion in das Plasma eingebrachte Heizenergie ausgeglichen wird, muss das Produkt aus Plasmatemperatur, Plasmadichte und einer charakteristischen Einschlusszeit³ des Plasmas einen bestimmten Wert überschreiten – das sogenannte Lawson-Kriterium. Die Einschlusszeit beeinflusst, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass die Heliumkerne, die bei der Fusionsreaktion entstehen, zusammenstoßen. Je länger sie bei gleicher Temperatur und gleichem Druck ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass die Heliumkerne durch Zusammenstöße ihre Energie an das Plasma abgeben, es damit heizen und auf diese Weise aufrechterhalten. Wird das Lawson-Kriterium erreicht, spricht man von der Zündung des Plasmas. [5; 6; 7; 1]

3 Die Einschlusszeit gibt an, in welcher Zeit das Plasma seinen Energieinhalt an seine Umgebung abgibt. Bei der Trägheitsfusion wird durch die deutlich höhere Plasmadichte bei der Fusionsreaktion (circa 10^{25} Teilchen/cm³) eine viel kürzere Energieeinschlusszeit (10^{-9} Sekunden) benötigt als bei der Magnetfusion. Dort beträgt die Einschlusszeit mindestens 1 Sekunde bei einer Plasmadichte von 10^{14} Teilchen/cm³. [5]

Wie unterscheiden sich Kernfusion und Kernspaltung?

Sowohl bei der Kernfusion als auch bei der Kernspaltung wird Energie, die in Atomkernen gebunden ist, freigesetzt. Der wesentliche Unterschied ist: Bei der **Kernfusion** wird sie freigesetzt, indem Atomkerne mit einer geringen Protonenanzahl (leichte Elemente) miteinander verschmelzen – es **entstehen Elemente mit einer höheren Protonenanzahl** im Kern. Im Gegensatz dazu ergibt sich die Energie bei der **Kernspaltung** aus der Spaltung von Atomkernen mit einer hohen Protonenanzahl (schwere Elemente). Als **Produkte** entstehen Elemente **mit einer geringeren Zahl an Protonen** im Atomkern.

Bei der Kernspaltung ist bei den meisten Kraftwerkstypen ein gezieltes Eingreifen notwendig, um eine ungewollte Kettenreaktion zu verhindern. Bei der Kernfusion ist das anders: Hier erfolgt die Kernreaktion nur, wenn das technisch anspruchsvoll aufrechtzuerhaltende Verhältnis aus Plasmadruck, Plasmatemperatur und Einschlusszeit gehalten wird. Verändert sich beispielsweise der Druck durch ein Leck, kommt die Reaktion von selbst schnell zum Stillstand. Die Gefahren durch Rest- beziehungsweise Nachzerfallswärme, die von den Brennstoffen im Reaktor abgegeben werden, ist außerdem geringer. Die Reaktorkammer von Kernspaltungskraftwerken enthält Brennstoffmengen für einen längeren Betrieb. Bei Fusionskraftwerken würden die Brennstoffe hingegen stetig der Reaktorkammer von außen zugeführt werden. Ohne weiteren Brennstoff und durch den schnellen Abbruch der Kernfusionsreaktion können, anders als bei Kernspaltungskraftwerken, somit schnell keine radioaktiven Kerne mehr entstehen. Eine fortlaufende Kühlung zur Ableitung der Nachzerfallswärme ist somit nicht nötig. Ein Fusionskraftwerk geht also im Schadensfall gewissermaßen automatisch in einen Sicherheitszustand über.

	Kernfusion (engl. fusion)	Kernspaltung (engl. fission)
Prozess	<ul style="list-style-type: none"> • Verschmelzen von Atomkernen 	<ul style="list-style-type: none"> • Spaltung von Atomkernen
Ausgangsstoffe	<ul style="list-style-type: none"> • leichte Elemente und ihre Isotope, vornehmlich die Wasserstoffisotope Deuterium (^2H) und Tritium* (^3H) 	<ul style="list-style-type: none"> • schwere Elemente, häufig Uran* (^{235}U) oder Plutonium* (^{239}Pu)
Reaktionsprodukte	<ul style="list-style-type: none"> • abhängig vom Brennstoff • Beispiel: Deuterium und Tritium wird zu Helium (^4He) und Neutron 	<ul style="list-style-type: none"> • abhängig vom Brennstoff • Beispiel: Uran* (^{235}U) wird zerlegt in eine Vielzahl an radioaktiven Stoffen (u. a. Strontium* (^{90}Sr), Cäsium* (^{137}Cs), Barium* (^{145}Ba)), Neutronen, Elektronen und stabilen Elementen (z. B. ^{207}Pb)
Temperatur/Energiegewinnung	<ul style="list-style-type: none"> • zunächst sehr hohe, extern bereitzustellende Ausgangstemperaturen zum Start der Reaktion erforderlich (etwa 100 - 150 Millionen Grad Celsius) • Kernfusion setzt Bewegungsenergie und damit Wärme frei, die zur Energiegewinnung genutzt wird 	<ul style="list-style-type: none"> • circa 290 - 1.000 Grad Celsius im Primärkreislauf⁴ [8; 9]; durch Spaltungsprozess entsteht Bewegungsenergie/Wärme, die zur Energiegewinnung eingesetzt wird
Sicherheit	<ul style="list-style-type: none"> • keine unkontrollierbare Kettenreaktion, aber ggf. Freisetzung von Tritium* • je nach eingesetztem Fusionsverfahren, Reaktormaterialien und/oder Brennstoffen entstehen radioaktive Abfälle • Abfälle sind in der Regel niedrig bis mittelradioaktiv, das heißt Lagerung in Größenordnung von circa 100 Jahren bis zum Abklingen [7; 4; 10] 	<ul style="list-style-type: none"> • Gefahr von Störfällen, die zu unkontrollierbaren Kettenreaktionen und zur Freisetzung (hoch)radioaktiver Stoffe führen können • hohe Strahlungsbelastung mit langen Halbwertszeiten speziell bei verbrauchten Brennstoffen • Abfälle reichen von niedrig- bis hochradioaktivem Abfall; wenn hochradioaktiv, dann Endlagerung in Deutschland für bis zu 1 Million Jahren geplant⁵

Tabelle 1: Unterschiede zwischen Kernfusion und Kernspaltung

*radioaktiv

4 Siedewasserreaktoren: circa 290 Grad Celsius bei 70 Bar; Druckwasserreaktoren (weltweit häufigste Reaktorart): circa 320 Grad Celsius bei 160 Bar; bis zu Hochtemperaturreaktoren mit > 1.000 Grad Celsius [8; 9].

5 Standortauswahlgesetz, § 1.2

Welche Konzepte für Kernfusionskraftwerke gibt es?

Um die Kernfusion perspektivisch für die Strom- und teils auch Wärmeerzeugung einsetzen zu können, wird an **zwei Grundprinzipien** geforscht, der Magnet- und der Trägheitsfusion. Bei beiden Ansätzen würde es sich im Fall einer erfolgreichen Umsetzung um **thermische Kraftwerke** handeln. Die während der Kernfusionsreaktion freigesetzten Teilchen, meist Neutronen, werden von der inneren Reaktorwand eingefangen und abgebremst. Dabei wird ihre Bewegungsenergie in Wärme umgewandelt, die anschließend an einen Wärmetauscher beziehungsweise in einen Wärmekreislauf abgegeben wird, der heißen Dampf erzeugt. Dieser treibt Turbinen an, die wiederum Generatoren in Bewegung setzen und so schlussendlich den gewünschten Strom produzieren. [4; 11; 12; 7]

Magnetfusion

Bei der **Magnetfusion** wird das ionisierte Gas, das die Brennstoffe für die Kernfusionsreaktion enthält, durch starke Magnetfelder im Reaktor eingeschlossen. Eine externe Heizung erhitzt das Gemisch auf über 100 Millionen Grad Celsius, sodass es in den Plasmazustand übergeht und es dann zur Zündung der Kernfusionsreaktion kommt. Für die Plasmazündung stellt die Heizung dabei für einige Sekunden zwischen 50 bis 100 Megawatt an Energie bereit [13]. Wenn die Atomkerne miteinander fusionieren und sich das **Plasma** durch die erzeugte Wärme **selbst trägt**, kann die Heizung abgeschaltet werden. [1; 11; 12; 13] Wegen der längeren Einschusszeit bei etwa gleichem Temperaturniveau muss das Plasma im Vergleich zur Trägheitsfusion nicht stark verdichtet werden – ein Druck im Bereich von 3-7 bar reicht bereits aus. Um einen optimalen Energietransport im Plasma zu erreichen, werden Magnetfusionsreaktoren großvolumige Anlagen mit rund 1.000 Kubikmetern Brennkammervolumina sein müssen. [4]

Der **Magneteinschluss** des Plasmas dient einerseits dazu, dass die Teilchen im Plasma oft genug zusammenstoßen, um fusionieren zu können. Gleichzeitig wird so verhindert, dass das Plasma die Innenwand des Reaktorgefäßes berührt und auf diese Weise seine Energie abgibt, was zur Beendigung des Plasmazustands und damit der Kernfusionsreaktion führen würde. Außerdem könnten beim Kontakt mit der Reaktorwand Teilchen aus dieser herausgelöst werden, die das Plasma verunreinigen. [1; 11; 12]

Der Tokamak und der Stellarator bilden die zwei wichtigsten **Reaktortypen** der Magnetfusion. Bei beiden wird das Plasma durch Magnete in einem ringförmigen Reaktorgefäß gehalten. Die Geometrien der Magnetfelder, die die Brennkammer durchdringen, unterscheiden sich jedoch (siehe Abbildung 2).

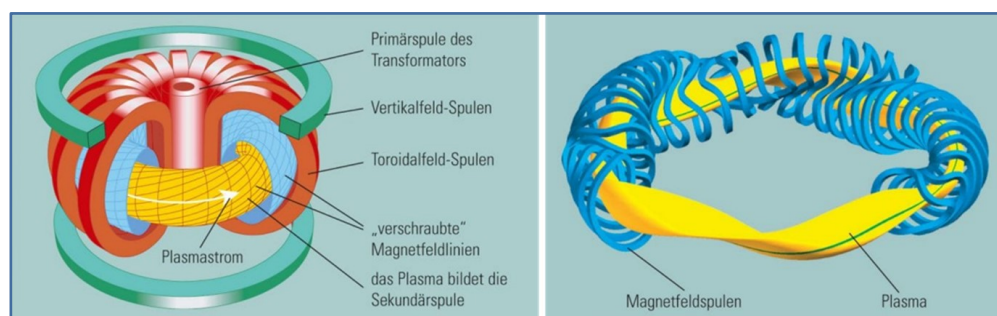


Abbildung 2: Vergleichende Darstellung des Designs eines Tokamaks (links) und eines Stellarators (rechts).

Quelle: © Wengenmayr, R. | MPI für Plasmaphysik / CC BY-NC-ND 4.0 [14]

Beim **Tokamak** wird das Plasma durch drei sich überlagernde Magnetfelder gehalten: Der Torus, dessen Form häufig mit einem Donut verglichen wird, ist von Spulen umgeben, die für ein ringförmiges Magnetfeld sorgen (siehe Abbildung 2). Um zu verhindern, dass das Plasma der Reaktorwand zu nahe kommt und um eine gleichmäßige Energieverteilung im Plasma zu ermöglichen, ist ein zweites Magnetfeld notwendig, das die Teilchen in ihrer Bewegung zusätzlich in Rotation versetzt. Es entsteht durch den im Plasma fließenden elektrischen Strom, der über eine im Inneren des Tokamaks platzierte Transformatorspule erzeugt wird. Als Drittes schließen Vertikalspulen den Plasmastrom mit ihrem Magnetfeld nach oben und unten ein. Der Nachteil dieses vergleichsweise einfachen Aufbaus: Tokamaks werden bisher im sogenannten gepulsten Betrieb gefahren, weil die für den inneren Stromfluss zuständige Transformatorspule nach einiger Zeit aus- und wieder eingeschaltet werden muss. [11; 15] Es gibt in der Forschung allerdings auch Ideen, mit denen ein Dauerbetrieb perspektivisch möglich werden soll.

Der **Stellarator** hingegen kann dem Konzept nach im Dauerbetrieb gefahren werden. Die beim Tokamak durch den Stromfluss erzeugte zusätzliche Rotation der Teilchen in der Brennkammer wird hier durch eine spezielle Anordnung und Form der Magnetspulen erreicht – ein Stromfluss im Inneren ist somit nicht notwendig. Die Spulenanordnung ist dadurch jedoch sehr komplex und konnte erst ab den 1980ern über Simulationen mit Großrechnern realisiert werden, als diese rechenstark genug waren. [11; 16]

Trägheitsfusion

Bei der **Trägheitsfusion** werden die Fusionsbedingungen im Gegensatz zur Magnetfusion nur für einen sehr kurzen Zeitraum – in der Regel wenige Nanosekunden lang – erreicht. Mit **hochenergetischen Laser- oder Ionenstrahlen** wird dazu auf ein sogenanntes Target geschossen. Dabei handelt es sich um eine Kapsel oder eine Kugel von mehreren Millimetern Durchmesser, in der sich die Brennstoffe befinden, die fusionieren sollen.

Der Name Trägheitsfusion rührt daher, dass die **Massenträgheit** entscheidend für die Zündung des Plasmas ist (siehe Abbildung 3). Während des sehr kurzen, intensiven Energiebeschusses wird der Brennstoff unter der äußeren Schicht des Targets so stark zusammengedrückt (Kompressionsphase), dass die benötigten Bedingungen entstehen, um das Plasma zu zünden: eine Temperatur von über 100 Millionen Grad Celsius, ein Druck von Hunderten Gigabar und eine über tausendfache Festkörperdichte. Im Anschluss an die Plasmazündung wird die bei der Kernfusion freiwerdende Energie nach außen abgegeben. [4; 17]



Abbildung 3: Ablaufschema der Trägheitsfusion (ICF). Quelle: Grafik FOCUSED ENERGY [18] mit geänderten Texten.

Es gibt **verschiedene Grundkonzepte** im Bereich der Trägheitsfusion, an denen gegenwärtig intensiver geforscht wird. Am weitesten fortgeschritten ist das Indirect-drive-Verfahren, gefolgt von Direct drive, Fast ignition und Shock ignition. [4; 1; 19]:

- Bei **Indirect drive** befindet sich das Target im Inneren eines zylindrischen Behälters. Die Laserstrahlen dringen durch Wandöffnungen in dessen Inneres ein, treffen dort auf die Innenwand des Hohlkörpers und es entsteht Röntgenstrahlung (sogenannte Hohlraumstrahlung). Diese wirkt gleichmäßig auf das mittig platzierte Target ein und verdichtet es gleichmäßig, bis es zur Zündung der Kernfusion kommt.
- Bei **Direct drive** werden die hochenergetischen Laserstrahlen von verschiedenen Seiten direkt auf die Brennstoffkugel gerichtet. Durch den direkten Beschuss wird die Energie effizienter in das Target eingekoppelt als beim Indirect drive. Allerdings müssen die Laser- oder Ionenstrahlen die Brennstoffkugel von allen Seiten hochgradig symmetrisch treffen, ansonsten wird die gleichmäßige Kompression des Targets und damit eine Zündung des Plasmas nicht erreicht.
- Im Gegensatz zu Direct und Indirect drive führt beim **Fast-ignition**-Verfahren die per Laser- oder Energieimpuls herbeigeführte Kompressionsphase nicht bis zur Zündung der Fusionsreaktion. Die Zündung wird erst durch einen zusätzlichen kurzen Laser- oder Ionenstrahlimpuls ausgelöst, der durch ein Loch oder eine Art Hohlkegel auf das Innere des zuvor zusammengepressten Targets trifft. Damit muss weniger Energie zur Zündung aufgebracht werden.
- Auch beim **Shock-ignition**-Verfahren sind die Kompressions- und die Zündungsphase voneinander getrennt: Im Anschluss an die per Laser herbeigeführte Kompression erfolgt die Zündung durch einen zusätzlichen kurzen, sehr energetischen Laserimpuls, der stoßartig auf das Target wirkt. Anders als bei der Fast ignition wird er nicht direkt in das Innere des Targets geleitet. Bei beiden Verfahren können für den Schritt der Verdichtung des Targets Indirect- oder Direct-drive-Ansätze zur Anwendung kommen.

Welche Brennstoffe kommen bei der Kernfusion zur Anwendung?

Die Magnet- und die Trägheitsfusion unterscheiden sich nicht hinsichtlich der Elemente, die miteinander fusionieren. Bei beiden Konzepten können prinzipiell die gleichen Brennstoffe zur Anwendung kommen. Je mehr Protonen die Elemente, die miteinander fusionieren sollen, im Atomkern enthalten, umso mehr Energie ist allerdings nötig, um die Abstoßungskräfte zwischen ihren Kernen zu überwinden. Die reaktionsfreudigste und damit am einfachsten zu realisierende Kernfusionsreaktion ist die der zwei Wasserstoffisotope⁶ **Deuterium** und **Tritium**, weil Wasserstoffatome jeweils nur ein Proton im Kern enthalten. [20] Im Vergleich zu anderen Brennstoffen benötigt ihre Kernfusion daher die niedrigste Temperatur. Außerdem ist bei dieser Reaktion der Fusionsgewinn theoretisch am höchsten, also das Verhältnis aus der gewonnenen und der ins Plasma eingebrachten Energie. Deuterium und Tritium sind entsprechend die am häufigsten verwendeten Brennstoffe bei Kernfusionsexperimenten und würden aus heutiger Sicht am ehesten in Fusionskraftwerken zur Anwendung zu kommen. [4; 21; 22]

Diese Brennstoffkombination hat jedoch auch Nachteile: Tritium ist radioaktiv (Betastrahler mit einer Halbwertszeit von 12 Jahren) und kommt in der Natur kaum vor. Es muss also gezielt hergestellt werden. Bei Kernfusionsreaktionen freigesetzte Neutronen aktivieren darüber hinaus die Materialien der Bauteile des Reaktorsinneren, wodurch diese in der Regel leicht- bis mittelradioaktiv werden. Auch aus diesen Gründen wird auch an Fusionsreaktionen geforscht, bei denen weitere Elemente als Brennstoffe zum Einsatz kommen. Dazu zählt die Kernfusion **zweier Deuteriumatome**, die **zweier Heliumatome**, die Reaktion von **Deuterium mit Helium** oder die von einfachem Wasserstoff mit Bor, auch **Proton-Bor-Reaktion** genannt. Bei einigen dieser Reaktionen entstehen im Vergleich nur wenige Neutronen, wodurch die radioaktive Belastung durch aktivierte Reaktormaterialien sinkt. Allerdings ist bei diesen durch die höhere Zahl an Teilchen in den Kernen der fusionierenden Elemente deutlich mehr Energie zur Bildung des Plasmas nötig. Die dafür erforderlichen höheren Temperaturen oder Drücke stellen zugleich erweiterte Ansprüche an die im Reaktor eingesetzten Materialien. [4; 21; 22]

6 Beim einfachen Wasserstoffatom befindet sich im Atomkern nur ein Proton (^1H). Deuterium ($^2\text{H}/\text{D}$), auch schwerer Wasserstoff genannt, enthält im Kern ein Proton und ein Neutron. Beim Tritium ($^3\text{H}/\text{T}$), auch als überschwerer Wasserstoff bezeichnet, kommt im Kern ein weiteres Neutron hinzu. Rund 99,99 Prozent des natürlichen Wasserstoffs auf der Erde sind einfacher Wasserstoff. Der natürliche Anteil von Deuterium beträgt lediglich 0,015 Prozent, der von Tritium liegt noch einmal deutlich darunter bei 10^{-15} Prozent. (Mortimer et al. 2015) [20]

Wie hat sich die Kernfusion historisch entwickelt?

Der Wunsch, die Kernfusion zur Energiegewinnung zu nutzen, ist inzwischen über 100 Jahre alt. 1920 beschrieb der britische Astrophysiker Arthur Eddington diese Vision in seinem Artikel über die inneren Verhältnisse von Sternen [23]. Irving Langmuir, amerikanischer Physiker und Chemiker, erforschte unter anderem ionisierte Gase und prägte 1928 den Begriff des Plasmas [24]. Mithilfe eines Teilchenbeschleunigers, der eine Metallfolie beschoss, gelang 1934 Mark Oliphant, Paul Hareck und Ernest Rutherford unter Verwendung von Deuterium die erste gezielt herbeigeführte Kernfusionsreaktion, bei der Helium gebildet wurde. In einem Folgeexperiment entdeckten sie zudem das Wasserstoffisotop Tritium. [25; 26; 27]

Die ersten zivilen Konzepte zur Nutzung der Kernfusion mit dem Ziel der Energieerzeugung waren Konzepte der Magnetfusion: 1950 entwickelten die beiden sowjetischen Forscher Andrei Sacharow und Igor Tamm das Konzept des Reaktortyps Tokamak [28]. Nur ein Jahr später erarbeitete der US-amerikanische Astronom und Physiker Lyman Spitzer dann den Entwurf für den zweiten zentralen Ansatz der Magnetfusion, den Stellarator [29].

Systematisch vorangetrieben wurde die Kernfusionsforschung in den 1950ern allerdings nicht vorrangig aus energiewirtschaftlichen Erwägungen, sondern für militärische Zwecke. Denn in den 1940ern wurde das militärische Potenzial der Kernfusion für die Atomwaffenforschung ersichtlich [30], was letztlich sowohl in den USA als auch in der Sowjetunion in der Entwicklung der Wasserstoffbombe mündete.⁷ [31; 32; 33] Vor dem Hintergrund des beginnenden Kalten Krieges und seiner Systemkonkurrenz standen in beiden Ländern daher selbst nichtmilitärische, energiewirtschaftlich ausgerichtete Forschungsergebnisse meist unter Verschluss [34].

Einen Wendepunkt stellte die „Atoms for Peace“-Konferenz 1958 in Genf dar: Wegen der vielfältigen Herausforderungen in der Kernfusions- und Plasmaforschung wurde die US-militärische Geheimhaltung für die damaligen Konzepte der Magnetfusion aufgehoben, sodass diese – zusammen mit Modellen von möglichen Anlagen und Kraftwerken – der internationalen Forschungsgemeinschaft präsentiert und gemeinsam diskutiert werden konnten. Mit diesem Impuls startete die gezielte internationale Zusammenarbeit in der zivilen Kernfusionsforschung. [35; 34; 36]

⁷ 1952 zündeten die USA am Boden erstmalig eine Wasserstoffbombe. 1953 testete die Sowjetunion erfolgreich eine Kernspaltungsbombe, deren Sprengkraft zu 20 Prozent auf eine Kernfusionsreaktion zurückging, bevor 1955 der Abwurf der ersten „echten“ sowjetischen Wasserstoffbombe aus einem Flugzeug erfolgte. [31; 32; 33]



Abbildung 4: Besondere historische Ereignisse der Entwicklung der Kernfusion. Quelle: eigene Darstellung.

Anfang der 1960er entdeckten Forschende, dass im Plasma Instabilitäten entstehen können, die zu einem rapiden Verlust thermischer und magnetischer Energie führen und bis heute eine Herausforderung für das Tokamak-Konzept darstellen [36]. Trotzdem erfolgte 1968 ein Durchbruch: Eine Gruppe aus sowjetischen Wissenschaftlern um Andrei Sacharow und Igor Tamm erreichte mit dem sowjetischen T-3 Tokamak erstmals Temperaturen, wie sie im Sonneninneren herrschen, und eine zehnfach höhere Leistung als bei anderen bis dahin existierenden Fusionsforschungsreaktoren. Durch diesen Erfolg wurde der Tokamak für viele Jahre zum dominierenden Designkonzept für Kernfusionsreaktoren. [27; 37; 36]

Mit der Entdeckung des Lasers in den 1960ern erweiterte sich das technische Spektrum der Kernfusionskonzepte: Neben der Magnetfusion begann nun auch die Forschung an der Trägheits- beziehungsweise Laserfusion. [38] Die Idee, eine Kernfusion mithilfe gepulster Laserenergie zu starten, hatten sowohl sowjetische als auch amerikanische Wissenschaftler. Nikolai Bassow und Andrei Krochin führten ab 1964 dazu in der Sowjetunion gezielt Experimente durch. [39] Die ersten Entwicklungen unterlagen allerdings auch hier der militärischen Geheimhaltung. Nach einer Veröffentlichung zur Laserkompression [40] nahm ab 1972 das wissenschaftliche Interesse an der Trägheitsfusion deutlich zu, was zur Lockerung der Geheimhaltung beitrug. [41; 42]

In den 1970er-Jahren intensivierte sich die weltweite Kooperation zur energiewirtschaftlichen Nutzung der Kernfusion: So beschloss 1978 Euratom⁸ zusammen mit Schweden und der Schweiz den Bau des Tokamaks JET (Joint European Torus) in Großbritannien – nach seiner Fertigstellung lange Zeit der größte Reaktor seiner Art. [43; 44; 45] Stimuliert durch die Ölkrise wurden mehrere alternative Einschlusskonzepte parallel verfolgt und gezielt staatlich

⁸ Die Europäische Atomgemeinschaft (Euratom) war damals eine Organisation der Europäischen Gemeinschaft (EG), dem Vorläufer der Europäischen Union (EU). Sie ist bereits 1957 als einer der ersten Verträge der gezielten europäischen Zusammenarbeit gegründet worden. Zum Ziel hat sie, unter den europäischen Mitgliedsstaaten die Koordination, den Ausbau und die Forschung der zivilen Nutzung der Kernenergie zu fördern, zu koordinieren und zu stärken. Ein Teil der Arbeit bezieht sich dabei auch auf die Kernfusionsforschung. So war/ist Euratom zum Beispiel in die Aktivitäten zur Realisierung der Forschungsreaktoren JET (Tokamak/Großbritannien/stillgelegt) und ITER (Tokamak/Frankreich/im Bau) eingebunden. [43; 44; 45]

gefördert, was zu deutlichen Fortschritten in der Grundlagen- und Begleitforschung führte. [27]

Zusätzlich koordinierte die IAEA (International Atomic Energy Agency) die Forschung an begleitenden Aspekten wie möglichen Umweltauswirkungen und Sicherheitsfragen. [36] In den 1980ern stellte die Entwicklung von Hochleistungsrechnern für den Stellarator einen entscheidenden Fortschritt dar, weil sich nun erstmals Konfigurationen für das komplexe Zusammenspiel seiner Spulenelemente ermitteln ließen. [34; 46]

Die Staatsoberhäupter Michail Gorbatschow (Sowjetunion) und Ronald Reagan (USA) bestätigten im Herbst 1985, gegen Ende des Kalten Krieges, die Bedeutung einer Kooperation im Bereich der friedlichen Nutzung der Kernfusion, was drei Jahre später zur Gründung des internationalen Joint Ventures ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) führte. Neben der Sowjetunion und den USA waren Japan und die Europäische Gemeinschaft (EG) weitere ITER-Gründungsmitglieder.⁹ Mit diesem Demonstrationsreaktor vom Typ Tokamak, der gegenwärtig im französischen Cadarache gebaut wird, soll erstmals im Kraftwerksmaßstab die grundsätzliche technologische Machbarkeit der Kernfusion als Energiequelle bestätigt werden. Der Testreaktor wird allerdings nicht mehr Energie produzieren, als die gesamte Anlage zum Betrieb benötigt, und auch keinen Strom ins Netz einspeisen. Dies soll mit dem ITER-Nachfolger und Kraftwerksprototypen DEMO gelingen, dessen Inbetriebnahme gegenwärtig um 2050 herum geplant ist. [47; 48; 49]

⁹ Aktuell sind China, Euratom (inklusive Großbritannien), Indien, Japan, Südkorea, Russland und die USA Mitglieder des ITER-Konsortiums.

Welche Fortschritte hat die Kernfusionsforschung in letzter Zeit erreicht?

Die Kernfusionsforschung weckt bereits seit längerer Zeit Hoffnungen auf eine neue Energiequelle, die zudem klimafreundlich wäre. Zur gegenwärtig höheren öffentlichen Aufmerksamkeit für die Kernfusion tragen unter anderem die in den letzten Monaten und Jahren erreichten **Forschungserfolge** in diesem Bereich bei, die teils sogar öffentlich wahrgenommen wurden:

- Etwa siebzehneinhalb Minuten ist bisher die längste Zeitspanne, über die ein stabiles Plasma aufrechterhalten werden konnte. Das gelang im Dezember **2021** in einem Magnetfusionsexperiment mit dem chinesischen Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST). [50]
- Im Labormaßstab eine Kernfusion zu realisieren, bei **der mehr Energie erzeugt** als zuvor in die Reaktorkammer zum Start der Fusionsreaktion eingebracht wurde, gelang erstmals im Dezember **2022** in einem Laserfusionsexperiment an der National Ignition Facility (NIF) in den USA. Diese positive Energiebilanz bezieht sich allerdings nicht auf die gesamte Anlage, denn die benötigte Energie zum Betrieb der Laser, für die Diagnosetechnik, Steuerungssysteme und so weiter übersteigt die freigesetzte Energie noch um ein Vielfaches. [51; 21]
- Mit dem deutschen Testreaktor „Wendelstein 7-X“ wurde im Februar **2023** ein Rekord in Bezug auf die Entladungszeit des Plasmas in einem Stellarator aufgestellt: Rund acht Minuten lang konnte das Plasma in diesem Magnetfusionsexperiment aufrechterhalten werden. [52]
- Mit dem inzwischen stillgelegten europäischen Forschungsreaktor JET, einem Tokamak, wurde die bisher größte Menge an Energie im Rahmen eines Kernfusionsexperiments erzeugt. Am 3. Oktober **2023** führte eine 5,2 Sekunden andauernde Plasmaentladung zu einer Energiefreisetzung von 69 Megajoule. Die eingesetzte Energie für die Zündung des Plasmas überstieg aber auch bei diesem Magnetforschungsexperiment die aus der Reaktion gewonnene Energie. [53]

Neben den erreichten Forschungserfolgen hat auch die in den zurückliegenden Jahren weltweit deutlich gestiegene Zahl an Start-ups, die sich einer kommerziellen Umsetzung der Kernfusion verschrieben haben, spürbar Auftrieb gegeben. Dabei verfolgen diese Unternehmen auch Technologieansätze, die von den etablierten Forschungseinrichtungen nicht gezielt weiterverfolgt werden oder bisher nicht sehr weit entwickelt sind. Somit steigern ihre Aktivitäten einerseits die Bandbreite an Lösungskonzepten, andererseits werben sie für die Umsetzung der Kernfusion wichtige zusätzliche Forschungs- und Entwicklungsgelder von privaten Investoren ein. [54; 55]

Kann die Kernfusion dabei helfen, die Klimaziele zu erreichen?

Mit Blick auf die erreichten Fortschritte und skizzierten Herausforderungen rechnen zahlreiche Fachleute mit einem ersten Kraftwerksprototypen beziehungsweise einem ersten kommerziellen Kraftwerk frühestens in 20 bis 25 Jahren, falls nicht ein unerwarteter disruptiver Durchbruch gelingt. Für die Energiewende mit ihrem Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energien bis 2045 in Deutschland und 2050 in der EU bedeutet dies, dass die Kernfusion keinen oder bestenfalls nur einen späten und kleinen Beitrag für deren Umsetzung beisteuern könnte. [56]

Die Kernfusionsforschung hat sich in den zurückliegenden Jahren systematisch weiterentwickelt. Dennoch ist sie **von der Umsetzung eines regulären Kraftwerksbetriebs noch weit entfernt**: Für ein kommerzielles Fusionskraftwerk muss die Energiebilanz, also die Gesamtenergieausbeute, bei der alle Energiebedarfe und -verluste des Kraftwerks der vom Kraftwerk erzeugten Energie gegenübergestellt werden, noch um ein Vielfaches gesteigert werden. **Für kein Kernfusionskonzept** existiert gegenwärtig **ein Prototyp** im Kraftwerksmaßstab, das heißt, es muss zunächst gezeigt werden, dass eine solche Anlage technisch möglich und dann auch wirtschaftlich tragfähig umzusetzen ist. Die technischen **Entwicklungsbedarfe** liegen nach aktuellem Kenntnisstand insbesondere im Bereich der Ausgestaltung der Bauteile der inneren Reaktorkammer, der Bereitstellung ausreichend widerstandsfähiger Materialien gegen Neutronenbeschuss und Hitze, der Produktion des Brennstoffs Tritium und der Herstellung der Brennstoffkapseln (Targets) sowie der Leistungsstärke und Schussfrequenz der Laser. [56]

Gelingt eine kommerzielle Einführung der Kernfusion in diesem Zeitraum, könnte die Kernfusion mit ihrem geringen CO₂-Ausstoß perspektivisch ab der zweiten Hälfte des Jahrhunderts einen relevanten Beitrag für die klimafreundliche Energieversorgung leisten. Dann träte sie in Deutschland und weiten Teilen Europas auf ein weitreichend umgestaltetes Energiesystem, in dem viele Lösungen strombasiert sein werden, dass stärker dezentral organisiert sein wird und zu einem hohen Anteil auf erneuerbaren Energien basiert. Fusionskraftwerke werden sich aus heutiger Perspektive etwa im Bereich von 1 Gigawatt elektrischer Leistung (1 GW_{el}) bewegen, was sich mit heutigen großen Kohle- und Atomkraftwerken vergleichen lässt. Durch die hohen Investitionen für ihre Errichtung und die tendenziell geringen Betriebskosten müssten sie, vergleichbar mit heutigen Grundlastkraftwerken, möglichst stetig Strom produzieren.

Als Großkraftwerke ließen sich Kernfusionskraftwerke in ein zukünftiges Energiesystem integrieren, wenn dieses genügend Flexibilität bereithält. Diese Flexibilitäten können sich insbesondere durch die Kopplung mit dem neu aufzubauenden Wasserstoffsystem ergeben, das ohnehin zu errichten ist, um die zahlreichen erneuerbaren Erzeugungsanlagen in das Energiesystem zu integrieren. Ob sich die Kernfusion wirtschaftlich durchsetzen kann, lässt sich hingegen gegenwärtig nicht zuverlässig abschätzen. Das wird vor allem von den Kosten abhängen, zu denen Fusionskraftwerke ihren Strom dann bereitstellen können. [57; 56]

Welche Rolle die Kernfusion in Zukunft im Energiesystem einnehmen wird, ist wegen des frühen Entwicklungsstands und dem weiterhin hohen Forschungsbedarf aus heutiger Sicht nicht klar zu beantworten. Gelingt ihre Umsetzung, hätte sie das Potenzial, voraussichtlich ab der zweiten Hälfte des Jahrhunderts zur klimafreundlichen Energieversorgung beizutragen. Da derzeit allerdings unklar ist, ob beziehungsweise wann die Kernfusion Strom ins Netz einspeist und zu welchen Kosten sie dann Energie bereitstellen kann, muss das Handeln im Energiebereich weiterhin darauf ausgerichtet sein, auch ohne Fusionskraftwerke eine CO₂-neutrale und sichere Energieversorgung bis zur Mitte des Jahrhunderts zu ermöglichen. Mit der Kernfusion perspektivisch eine zusätzliche Form der klimafreundlichen Energieerzeugung zur Verfügung

zu haben, wäre für die Menschheit zugleich ein hilfreicher Baustein, um die Erderwärmung zukünftig spürbar begrenzen zu können.

Mehr zum Thema

Wie ist der aktuelle Stand der Kernfusionsforschung? Welche Herausforderungen sind noch zu bewältigen? Welche Rolle könnten Fusionskraftwerke in einem zukünftigen Energiesystem einnehmen und wann könnte ein Fusionskraftwerk möglicherweise erstmals Strom ins Netz einspeisen? Um diese weiterführenden Fragen dreht sich der ESYS-Impuls:

Wurbs, Sven/ Dehlwes, Sonja et al. „Kernfusion als Baustein einer klimaneutralen Energieversorgung? Chancen, Herausforderungen, Zeithorizonte“ (Impuls), Schriftenreihe „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS), 2024, https://doi.org/10.48669/esys_2024-8.

Literatur

1 BMBF 2023

Bundesministerium für Bildung und Forschung: „*Positionspapier Fusionsforschung*“, 2023. URL: https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/7/775804_Positionspapier_Fusionsforschung.html.

2 dpg o. A.-1

Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V.: „*Grundlagen der Kernfusion*“. URL: <https://www.dpg-physik.de/vereinigungen/fachlich/smk/fvp/weiterfuehrende-informationen/grundlagen-der-kernfusion> [Stand: 12.07.2024].

3 MIT o. A.

Massachusetts Institute of Technology: „*What is Plasma?*“ URL: https://www.psf.mit.edu/vision/what_is_plasma [Stand: 09.07.2024].

4 Haefner et al. 2023

Haefner, C. L./Alexander, N./Betti, R./Hurricane, O./Ma, T./Stieglitz, R./Zohm, H.: „*Memorandum Laser Inertial Fusion Energy*“, 2023. URL: <https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230522-memorandum-laser-inertial-fusion-energy.pdf>.

5 Spektrum.de 1998

Spektrum.de: „*Energieeinschlußzeit*“, 1998. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/energieeinschlusszeit/4324> [Stand: 05.07.2024].

6 Lawson 1957

Lawson, J. D.: „*Some Criteria for a Power Producing Thermonuclear Reactor*“. In: *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 70: 1, 1957, S. 6. URL: <https://doi.org/10.1088/0370-1301/70/1/303>.

7 Sánchez 2014

Sánchez, J.: „*Nuclear Fusion as a Massive, Clean, and Inexhaustible Energy Source for the Second Half of the Century: Brief History, Status, and Perspective*“. In: *Energy Science & Engineering*, 2: 4, 2014, S. 165–176. URL: <https://doi.org/10.1002/ese3.43>.

8 BASE 2023

Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung: „*Leichtwasserreaktoren*“, 2023. URL: <https://www.base.bund.de/DE/themen/kt/kta-deutschland/kta-uebersicht/lwr/leichtwasserreaktoren.html> [Stand: 16.08.2024].

9 BASE 2024

Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung: „*Alternative Reaktorkonzepte*“, 2024. URL: https://www.base.bund.de/DE/themen/kt/kta-deutschland/neuartige-reaktorkonzepte/sogenannte-neuartige-reaktorkonzepte_node.html [Stand: 19.07.2024].

10 EFDA 2005

European Fusion Development Agreement: „*Final Report of the European Fusion Power Plant Conceptual Study*“, 2005.

11 IPP 2024-1

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik: „*Fusion Basics*“. (Kernfusion – Stand und Perspektiven, 2024. URL: [Stand: 12.07.2024].

12 MPG 2023

Max-Planck-Gesellschaft: „*Brennpunkte der Kernfusion*“, 2023. URL: <https://www.mpg.de/19734973/brennpunkte-der-kernfusion> [Stand: 12.07.2024].

13 IPP o. A.

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik: „*Aufbau und Funktion*“. URL: <https://www.ipp.mpg.de/12215/aufbau> [Stand: 12.07.2024].

14 Wengenmayr 2020

Wengenmayr, R.: „*Die Sonne im Tank*“. In: *Techmax 09*, aktualisiert 7/2020, MPI für Plasmaphysik. URL: <https://www.max-wissen.de/max-hefte/techmax-09-kernfusion>. <https://www.max-wissen.de/max-hefte/techmax-09-kernfusion>. [Stand: 05.08.2024].

15 dpg o. A.-2

Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V.: „*Magnetisch eingeschlossene Fusionsplasmen*“. URL: <http://www.dpg-physik.de/dpg/gliederung/fv/p/info/magnet.html> [Stand: 12.07.2024].

16 dpg o. A.-3

Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V.: „*Magnetisch eingeschlossene Fusionsplasmen*“. URL: <http://www.dpg-physik.de/dpg/gliederung/fv/p/info/magnet.html> [Stand: 12.07.2024].

17 IKP o. A.

Institut für Kernphysik: „*Trägheitsfusion und Fast Ignition*“. URL: https://www.ikp.tu-darmstadt.de/forschung_kernphysik/gruppen_kernphysik/experiment/ag_m_roth/forschung_ag_m_roth/fusionsforschung_ag_m_roth/index.de.jsp [Stand: 11.07.2024].

18 Focused Energy o. A.

Focused Energy: „*Creating the Power of the Stars on Earth*“. URL: <https://focused-energy.world/> [Stand: 29.07.2024].

19 Badziak 2012

Badziak, J.: „*Laser Nuclear Fusion: Current Status, Challenges and Prospect*“. In: Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, 60, 2012, S. 729. URL: <http://dx.doi.org/10.2478/v10175-012-0084-8>.

20 Mortimer/Müller 2015

Mortimer, C. E./Müller, U.: „*Chemie: das Basiswissen der Chemie*“, Stuttgart [u.a.]: Thieme, 2015.

21 Meschini et al. 2023

Meschini, S./Laviano, F./Ledda, F./Pettinari, D./Testoni, R./Torsello, D./Panella, B.: „*Review of Commercial Nuclear Fusion Projects*“. In: Frontiers in Energy Research, 11, 2023. URL: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1157394>.

22 Manheimer 2020

Manheimer, W.: „*Fusion Breeding for Mid-Century, Sustainable, Carbon Free Power*“. In: Heliyon, 6: 9, 2020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04923>.

23 Eddington 1920

Eddington, A. S.: „*The Internal Constitution of the Stars*“. In: The Scientific Monthly, 11: 4, 1920, S. 297–303. URL: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511600005>.

24 Langmuir 1928

Langmuir, I.: „*Oscillations in Ionized Gases*“. In: Proceedings of the National Academy of Sciences, 14: 8, 1928, S. 627–637. URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.33.195>.

25 Oliphant et al. 1997

Oliphant, M. L. E./Hartek, P./Rutherford, E.: „*Transmutation Effects Observed with Heavy Hydrogen*“. In: Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 144: 853, 1997, S. 692–703. URL: <https://doi.org/10.1098/rspa.1934.0077>.

26 EUROFusion o. A.

EUROFusion: „*Fusion History Timeline*“. URL: <https://euro-fusion.org/fusion/history-of-fusion/> [Stand: 12.07.2024].

27 Grunwald et al. 2002

Grunwald, A./Grünwald, R./Oertel, D./Paschen, H.: „*Kernfusion. Sachstandsbericht*“, 2002. URL: <https://doi.org/10.5445/IR/1000102229>.

28 Bonner 2005

Bonner, E.: „*Sakharov Is Tokamak's Originator*“. In: Physics Today, 58: 12, 2005, S. 15. URL: <https://doi.org/10.1063/1.2169425>.

29 Stix 1998

Stix, T. H. (Hrsg.): „*Highlights in Early Stellarator Research at Princeton*“. In: Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research, Nagoya, Japan, 1998.

30 Goncharov 1996

Goncharov, G. A.: „*Thermonuclear Milestones: (1) The American Effort*“. In: Physics Today, 49: 11, 1996, S. 45–48. URL: <https://doi.org/10.1063/1.881548>.

31 DOE 2006

United States Department of Energy: „*Battlefield of the Cold War*“, 2006. URL: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/DOENTSAtmospheric.pdf>.

32 Young/Schilling 2019

Young, K./Schilling, W. R.: „*Super Bomb: Organizational Conflict and the Development of the Hydrogen Bomb*“, Cornell University Press, 2019.

33 Wellerstein 2016

Wellerstein, A.: „*A Hydrogen Bomb By Any Other Name*“, 2016. URL: <https://www.newyorker.com/tech/annals-of-technology/a-hydrogen-bomb-by-any-other-name> [Stand: 10.08.2024].

34 Prager 2019

Prager, S. C.: „*Nuclear Fusion Power – An Overview of History, Present and Future*“. In: International Journal of Advanced Network, Monitoring and Controls, 4: 4, 2019, S. 1–10. URL: <https://doi.org/10.21307/ijanmc-2019-064>.

35 El-Guebaly 2010

El-Guebaly, L. A.: „*Fifty Years of Magnetic Fusion Research (1958–2008): Brief Historical Overview and Discussion of Future Trends*“. In: Energies, 3: 6, 2010, S. 1067–1086. URL: <https://doi.org/10.3390/en30601067>.

36 Barbarino 2020

Barbarino, M.: „*A Brief History of Nuclear Fusion*“. In: Nature Physics, 16: 9, 2020, S. 890–893. URL: <https://doi.org/10.1038/s41567-020-0940-7>.

37 Arnoux 2008

Arnoux, R.: „*August 1968: a Revolution in Fusion*“, 2008. URL: <https://www.iter.org/newsline/43/707> [Stand: 30.07.2024].

38 Häfner/Quay 2023

Häfner, C./Quay, R.: „*Öffentliche Anhörung des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung zum Thema - Fusionsforschung*“, 2023. URL: <https://www.bundestag.de/resource/blob/967158/cdaa4145ce452fc9d7d638168dda0f6e/20-18-139f-Haefner-Quay.pdf>.

39 Kalman/Carini 1978

Kalman, G./Carini, P. (Hrsg.): „*Strongly Coupled Plasmas*“, Boston, MA: Springer US, 1978.

40 Nuckolls et al. 1972

Nuckolls, J./Wood, L./Thiessen, A./Zimmerman, G.: „*Laser Compression of Matter to Super-High Densities: Thermonuclear (CTR) Applications*“. In: Nature, 239: 5368, 1972, S. 139–142. URL: <https://doi.org/10.1038/239139a0>.

41 Craxton et al. 2015

Craxton, R. S./Anderson, K. S./Boehly, T. R./Goncharov, V. N./Harding, D. R./Knauer, J. P./McCrory, R. L./McKenty, P. W./Meyerhofer, D. D./Myatt, J. F./Schmitt, A. J./Sethian, J. D./Short, R. W./Skupsky, S./Theobald, W./Kruer, W. L./Tanaka, K./Betti, R./Collins, T. J. B./Delettrez, J. A./Hu, S. X./Marozas, J. A./Maximov, A. V./Michel, D. T./Radha, P. B./Regan, S. P./Sangster, T. C./Seka, W./Solodov, A. A./Soures, J. M./Stoeckl, C./Zuegel, J. D.: „Direct-Drive Inertial Confinement Fusion: A Review“. In: Physics of Plasmas, 22: 11, 2015. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4934714>.

42 Carpintero-Santamaría/Velarde 2015

Carpintero-Santamaría, N./Velarde, G.: „The Pioneers' Legacy of Inertial Confinement Nuclear Fusion“. In: Progress in Nuclear Energy, 78, 2015, S. 349–354. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2013.10.019>.

43 Europäisches Parlament o. A.

Europäisches Parlament: „Euratom-Vertrag“. URL: <https://www.europarl.europa.eu/about-parliament/de/in-the-past/the-parliament-and-the-treaties/euratom-treaty> [Stand: 22.07.2024].

44 EU-Info o. A.

EU-Info: „EURATOM. (Europäische Zusammenarbeit in der zivilen Nutzung der Kernenergie)“. URL: <https://www.eu-info.de/europa/eu-eg-ewg/EURATOM/> [Stand: 22.07.2024].

45 BASE o. A.

Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung: „Europäische Zusammenarbeit für die Sicherheit in der Kerntechnik“. URL: <https://www.base.bund.de/DE/themen/kt/sicherheit/zusammenarbeit/europa/europa.html> [Stand: 22.07.2024].

46 Clery 2015

Clery, D.: „The Bizarre Reactor That Might Save Nuclear Fusion“, 2015. URL: <https://www.science.org/content/article/bizarre-reactor-might-save-nuclear-fusion> [Stand: 19.07.2024].

47 Arnoux 2014

Arnoux, R.: „ITER... and Then What?“, 2014. URL: <https://www.iter.org/mag/3/22> [Stand: 07.08.2024].

48 EUROFusion 2018

EUROFusion: „European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy“, Garching, 2018. URL: https://euro-fusion.org/wp-content/uploads/2022/10/2018_Research_roadmap_long_version_01.pdf.

49 WD Dt. Bundestag 2019

Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages: „Einzelfragen zur Kernfusionsforschung“, 2019. URL: <https://www.bundestag.de/resource/blob/710950/9e646e9903ac230c92b90192afde2646/WD-8-144-19-pdf-data.pdf>.

50 The EAST team/ITER Science Division 2022

The EAST team/ITER Science Division: „East Demonstrates 1000-Second Steady-State Plasma“, 2022. URL: <https://www.iter.org/newsline/-/3740> [Stand: 12.07.2024].

51 Abu-Shawareb et al. 2024

Abu-Shawareb et al.: „Achievement of Target Gain Larger than Unity in an Inertial Fusion Experiment“. In: Physical Review Letters, 132: 6, 2024. URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.065102>.

52 IPP 2023

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik: „Wendelstein 7-X erreicht Meilenstein: Leistungsplasma mit Gigajoule-Energieumsatz über acht Minuten erzeugt“, 2023. URL: https://www.ipp.mpg.de/5322014/01_23 [Stand: 12.07.2024].

53 IPP 2024-2

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik: „Kernfusion: Europäisches Gemeinschaftsexperiment erzielt Energierekord“, 2024. URL: https://www.ipp.mpg.de/5405998/PI01_2024_02_08_Fusionsenergierekord_JET_DE.pdf [Stand: 12.07.2024].

54 IAEA 2022

International Atomic Energy Agency: „World Survey of Fusion Devices 2022“, Vienna, 2022. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/CRCP-FUS-001webRev.pdf> [Stand: 05.08.2024].

55 FIA 2023

Fusion Industry Association: „The global fusion industry in 2023. Fusion Companies Survey by the Fusion Industry Association“, 2023. URL: <https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2023/07/FIA%E2%80%93FINAL.pdf> [Stand: 05.08.2024].

56 Wurbs et al. 2024

Wurbs, S./Dehlwes, S./Lübke, A./Stephanos, C./Stöcker, P./Fischedick, M./Henning, H.-M./Löschel, A./Matthies, E./Pittel, K./Renn, J./Sauer, D. U./Spiecker genannt Döhmann, I.: „Kernfusion als Baustein einer klimaneutralen Energieversorgung? Chancen, Herausforderungen, Zeithorizonte“ (Impuls), Schriftenreihe „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS), 2024. URL: https://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user_upload/Publicationen/PDFs/ESYS_Impuls_Kernfusion.pdf [Stand: 05.08.2024].

57 Stöcker et al. 2024 i.E.

Stöcker, P./Erlach, B./Wurbs, S./Stephanos, C./Fischedick, M./Henning, H.-M./Löschel, A./Matthies, E./Pittel, K./Renn, J./Sauer, D. U./Spiecker genannt Döhmann, I.: „Grundlastkraftwerke im treibhaus-gasneutralen Energiesystem“ (Impuls), Schriftenreihe „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS), im Erscheinen Herbst 2024. URL: <https://energiesysteme-zukunft.de/publikationen> [Stand: 05.08.2024].

Empfohlene Zitierweise

Wurbs, Sven/ Dehlwes, Sonja/ Lübke, Andrea/ Stephanos, Cyril/ Fishedick, Manfred/ Henning, Hans-Martin/ Löschel, Andreas/ Matthies, Ellen/ Pittel, Karen/ Renn, Jürgen/ Sauer, Dirk Uwe/ Spiecker genannt Döhmann, Indra: „Ist Kernfusion eine Energiequelle der Zukunft?“ (Kurz erklärt!), Schriftenreihe „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS), 2024, https://doi.org/10.48669/esys_2024-9.

Autorinnen und Autoren

Sven Wurbs (ESYS-Koordinierungsstelle | acatech), Sonja Dehlwes (ESYS-Koordinierungsstelle | acatech), Dr. Andrea Lübcke (acatech), Dr. Cyril Stephanos (ESYS-Koordinierungsstelle | acatech), Prof. Dr.-Ing. Manfred Fishedick (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH), Prof. Dr. Hans-Martin Henning (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE), Prof. Dr. Andreas Löschel (Ruhr-Universität Bochum), Prof. Dr. Ellen Matthies (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg), Prof. Dr. Karen Pittel (ifo Institut), Prof. Dr. Jürgen Renn (Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte), Prof. Dr. Dirk Uwe Sauer (RWTH Aachen), Prof. Dr. Indra Spiecker genannt Döhmann (Goethe-Universität Frankfurt)

Weitere Mitwirkende

Prof. Dr. Tony Donné (Frontiers in Energy Innovations - FEInn), Annika Eßmann (ESYS-Koordinierungsstelle | acatech), Polina Pienkina (ESYS-Koordinierungsstelle | acatech), Prof. Dr. Markus Roth (Focused Energy / TU Darmstadt), Philipp Stöcker (ESYS-Koordinierungsstelle | acatech), Dr. Alexander von Müller (Max-Planck-IPP)

Redaktion

Claire Stark (ESYS Koordinierungsstelle | acatech)

Produktionskoordination und Satz

Annika Seiler (ESYS Koordinierungsstelle | acatech)

Koordination Grafiken

Annika Eßmann (ESYS Koordinierungsstelle | acatech)

Grafikdesign

aweberdesign.de

Reihenherausgeber

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. (Federführung)
Koordinierungsstelle München, Karolinenplatz 4, 80333 München | www.acatech.de

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V.
– Nationale Akademie der Wissenschaften –
Jägerberg 1, 06108 Halle (Saale) | www.leopoldina.org

Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V.
Geschwister-Scholl-Straße 2, 55131 Mainz | www.akademienunion.de

DOI

https://doi.org/10.48669/esys_2024-9

Projektlaufzeit

03/2016 bis 12/2024

Finanzierung

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (Förderkennzeichen 03EDZ2016) gefördert.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Das Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“

Mit der Initiative „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS) geben acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften Impulse für die Debatte über Herausforderungen und Chancen der Energiewende in Deutschland. Im Akademienprojekt erarbeiten mehr als 160 Fachleute aus Wissenschaft und Forschung in interdisziplinären Arbeitsgruppen Handlungsoptionen zur Umsetzung einer sicheren, bezahlbaren und nachhaltigen Energieversorgung.

Das Format „Kurz erklärt!“

In dem kompakten Publikationsformat „Kurz erklärt!“ greift ESYS aktuelle, in der öffentlichen Debatte häufig kontrovers diskutierte Fragen rund um das Energiesystem auf und ordnet diese wissenschaftlich fundiert ein. Damit macht ESYS den aktuellen Stand der Forschung im Energiebereich auch für Menschen ohne besonderes Vorwissen verständlich.

Kontakt:

Dr. Cyril Stephanos

Leiter der Koordinierungsstelle „Energiesysteme der Zukunft“

Georgenstraße 25, 10117 Berlin

Tel.: +49 30 206 30 96 - 0

E-Mail: stephanos@acatech.de

web: energiesysteme-zukunft.de

Die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften unterstützen Politik und Gesellschaft unabhängig und wissenschaftsbasiert bei der Beantwortung von Zukunftsfragen zu aktuellen Themen. Die Akademiemitglieder und weitere Experten sind hervorragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem In- und Ausland. In interdisziplinären Arbeitsgruppen erarbeiten sie Stellungnahmen, die nach externer Begutachtung vom Ständigen Ausschuss der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina verabschiedet und anschließend in der *Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung* veröffentlicht werden.

Deutsche Akademie der
Naturforscher
Leopoldina e. V.
Nationale Akademie der
Wissenschaften
Jägerberg 1
06108 Halle (Saale)
Tel.: 0345 47239-867
Fax: 0345 47239-839
E-Mail: politikberatung@leopoldina.org
Berliner Büro:
Reinhardtstraße 14
10117 Berlin

acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften e. V.
Geschäftsstelle München:
Karolinenplatz 4
80333 München
Tel.: 089 520309-0
Fax: 089 520309-9
E-Mail: info@acatech.de
Hauptstadtbüro:
Georgenstraße 25
10117 Berlin

Union der deutschen Akademien
der Wissenschaften e. V.
Geschwister-Scholl-Straße 2
55131 Mainz
Tel.: 06131 218528-10
Fax: 06131 218528-11
E-Mail: info@akademienunion.de
Berliner Büro:
Jägerstraße 22/23
10117 Berlin