



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften

 **acatech**
DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

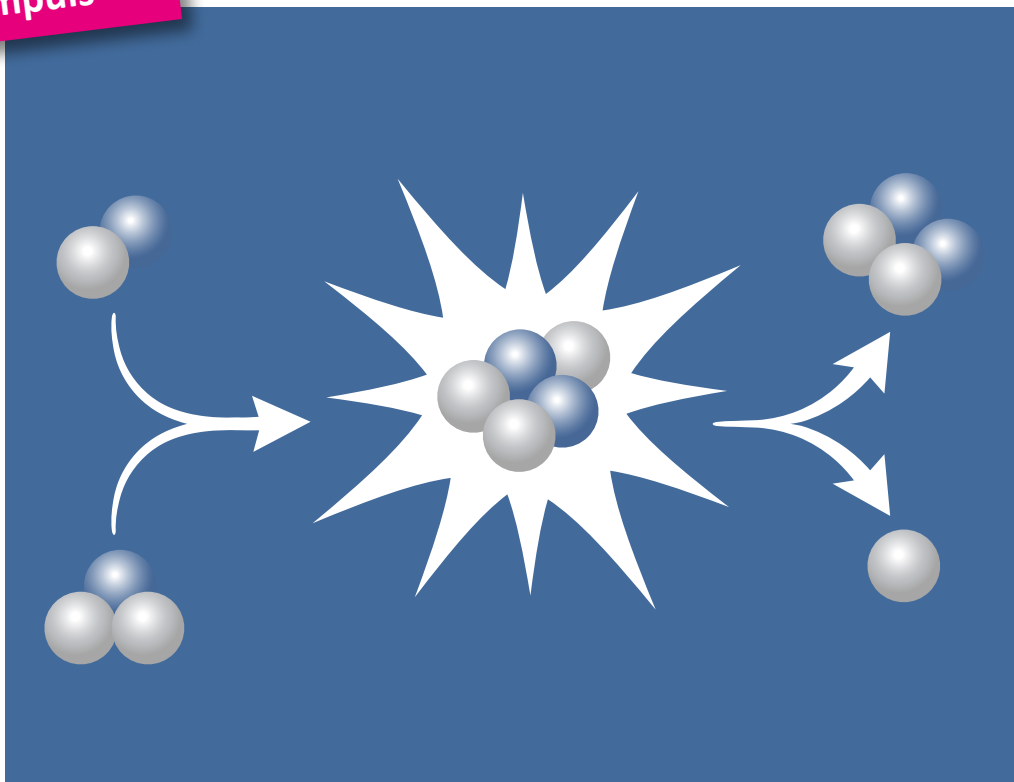
 **UNION**
DER DEUTSCHEN AKADEMIEN
DER WISSENSCHAFTEN

August 2024
Impuls

Kernfusion als Baustein einer klimaneutralen Energieversorgung? Chancen, Herausforderungen, Zeithorizonte

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

Impuls



Inhalt

Abkürzungen und Glossar	4
Zusammenfassung.....	9
Einleitung.....	12
1 Grundlagen	13
1.1 Wie kommt es zur Kernfusion?.....	13
1.2 Unterschied Kernfusion und Kernspaltung	14
2 Technologiekonzepte und Brennstoffe	16
2.1 Magnetfusion.....	16
2.2 Trägheitsfusion	17
2.3 Brennstoffe	19
3 Stand der Technik	21
3.1 Technologiereifegrade.....	21
3.2 Plasmastabilität und energetische Bilanzierung.....	23
4 Kernfusionsprojekte weltweit	25
4.1 Forschungseinrichtungen	25
4.2 Start-ups	27
5 Chancen und Benefits der Fusionsforschung	30
5.1 Begrenzte Umweltbelastungen	30
5.2 Wirtschaftliche Chancen und Hochtechnologieentwicklung	31
6 Herausforderungen auf dem Weg zum Kernfusionskraftwerk	32
6.1 Plasmaerhalt und Energiebilanz	32
6.2 Technische Komponenten.....	33
6.3 Materialien	35
6.4 Brennstoffe	36
6.5 Abfallmanagement.....	37
6.6 Regulierung	38
7 Zeithorizont: Bis wann umsetzbar?	41
8 Potenzielle Einbettung ins Energiesystem	43
8.1 Kosten der Stromerzeugung als entscheidender Faktor	43
8.2 Mögliche Anwendungsfelder	44
8.3 Integration in ein von erneuerbaren Energien geprägtes Energiesystem.....	45
9 Fazit und Ausblick	46
Literatur.....	47
Mitwirkende	46



Factsheet / Stand August 2024

Kernfusion als Baustein einer klimaneutralen Energieversorgung?

Was ist Kernfusion?

Bei der Kernfusion **verschmelzen leichte Atomkerne miteinander**, sodass neue Elemente mit einer höheren Anzahl an Teilchen in ihrem Kern entstehen. Zum Beispiel können zwei Wasserstoff-Atomkerne zu Helium-Atomkernen fusionieren. Je nachdem welche Elemente beteiligt sind, wird bei der Fusionsreaktion Energie frei.

Die Fusionsforschung hat sich zum Ziel gesetzt, diesen in der Sonne fortlaufend stattfindenden Prozess auf der Erde zur Stromerzeugung nutzbar zu machen. Das stellt hohe Anforderungen an die verwendeten Anlagen: **Damit es zur Kernfusionsreaktion kommt, sind sehr hohe Temperaturen und teils hohe Drücke nötig.**

Was macht die Kernfusion interessant?

Das Ziel der Kernfusionsforschung ist eine klimafreundliche und **kontinuierlich verfügbare Energiequelle** mit geringem Flächenbedarf und vor Ort verfügbaren Brennstoffen.

Die Hoffnung auf einen baldigen Durchbruch und damit auf eine weitere klimafreundliche Art der Energieerzeugung ist seit Ende 2022 groß: Damals gelang es Forscher*innen an der National Ignition Facility in Kalifornien erstmals im Labormaßstab, eine Kernfusion zu realisieren, bei der mehr Energie gewonnen werden konnte, als zuvor zu deren Start in die Reaktorkammer eingebracht wurde.

Physik verstanden, noch diverse praktische Herausforderungen

Die **physikalischen Prozesse** hinter der Kernfusion sind verstanden. Bevor ein regulärer Kraftwerksbetrieb möglich ist, braucht es noch Lösungen für **praktische Herausforderungen**, unter anderem:

- die Bereitstellung des **Brennstoffs Tritium**
- eine bessere **Energiebilanz** – heute liegen eingesetzte und gewonnene Energie noch deutlich auseinander
- **Materialien**, die den hohen Temperaturen und dem Neutronenbeschuss im Inneren der Anlagen dauerhaft standhalten
- hochleistungsfähige **Laser** bzw. effiziente **Hochfeldmagnetspulen**

Erste Kraftwerke wohl nicht vor 2045

Die Kernfusionsforschung bewegt sich **im Bereich der Grundlagen- und teilweise der angewandten Forschung**. Ein finales Kraftwerkskonzept gibt es noch für keines der beiden Fusionskonzepte.

Wegen der noch erforderlichen Entwicklungsarbeiten ist mit einem **ersten Fusionskraftwerk frühestens 2045** zu rechnen, wobei keine Gewähr für eine erfolgreiche Umsetzung besteht. Voraussetzung ist, dass alle offenen Fragen in Forschung Entwicklung intensiv und parallel angegangen werden.

An Kernfusion forschen, ohne bei Energiewende nachzulassen

Gelingt die Umsetzung, könnte die Kernfusion langfristig Teil einer klimafreundlichen Energieversorgung werden. Zum Erreichen der deutschen und europäischen **Klimaziele 2045/50** wird sie aller Voraussicht nach nicht beitragen.

Es ist sinnvoll, die Forschung an der Kernfusion fortzusetzen, ohne bei der Entwicklung und dem Aufbau eines klimafreundlichen Energiesystems, insbesondere unter Nutzung erneuerbarer Energien, nachzulassen.

Abkürzungen

Ba	Barium
CO₂	Kohlenstoffdioxid
Cs	Cäsium
D/²H	Deuterium
D₂O	schweres Wasser (Deuteriumoxid)
DAC	Direct Air Capture
DD	Direct drive
DEMO	DEMONstration Power Plant
EAST	Experimental Advanced Superconducting Tokamak
EE	erneuerbare Energien
engl.	englisch
ESYS	Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“
EU	Europäische Union
Fe	Eisen
FI	Fast ignition
H	Wasserstoff
He	Helium
IAEA	Internationale Atomenergie-Organisation (engl. = International Atomic Energy Agency)
ICF	Trägheitsfusion (engl. = Inertial Confinement Fusion)
IDD	Indirect drive
IPP	Max-Planck-Institut für Plasmaphysik
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
JET	Joint European Torus
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LCOE	Stromgestehungskosten (engl. = levelized cost of electricity)
LHD	Large Helical Device
LLNL	Lawrence Livermore National Laboratory
LMJ	Laser Mégajoule
MCF	Magnetfusion (engl. = Magnetic Confinement Fusion)
MeV	Megaelektronenvolt
MIT	Massachusetts Institute of Technology
N	Neutron
NIF	National Ignition Facility
p+B	Proton-Bor-Reaktion
Pu	Plutonium
SI	Shock ignition
Sr	Strontium
T/³H	Tritium
TRL	Technologiereifegrad (engl. = technology readiness level)
U	Uran
USA	Vereinigte Staaten von Amerika (engl. United States of America)
WHO	Weltgesundheitsorganisation (engl. = World Health Organization)

Glossar

Abklingzeit	Zeitspanne, in welcher der Wert einer stetig abnehmenden physikalischen Größe, z.B. der Radioaktivität, auf einen bestimmten Bruchteil des Anfangswertes abgeklungen ist. [1, s.v. Abklingzeit]
Abstoßungskraft	Kraft, die danach strebt, den Abstand zwischen Teilchen oder Teilsystemen zu vergrößern. Sie wird beispielsweise hervorgerufen durch eine starke Wechselwirkung (Kernkraft) gleichnamiger elektrischer Ladungen oder Magnetpole. Sie wird auch als negative Anziehung bezeichnet. [1, s.v. Anziehung]
Betastrahler	Betastrahler sind durch radioaktiven Zerfall entstehende Teilchen, die aus Elektronen (e^-) beziehungsweise deren Antiteilchen Positronen (e^+) bestehen. Betastrahlung ist damit eine Teilchenstrahlung, die aus ausgesandten Elektronen besteht, die beim radioaktiven Zerfall von Atomkernen entstehen. [2, s.v. Betastrahler, Betastrahlung]
Bewegungsenergie	Die Bewegungs- oder kinetische Energie ist die Energie, die ein Körper aufgrund seiner Bewegung besitzt. Sie entspricht der Arbeit, die notwendig ist, um den Körper aus dem Ruhezustand in seinen aktuellen Zustand der Bewegung zu versetzen. [3, s.v. Bewegungsenergie]
Bindungsenergie	Die Energie, die erforderlich ist, um einen Kern in die einzelnen Nukleonen zu zerlegen. Die Bindungsenergie entspricht dem Energieäquivalent des Massedefekts, das heißt der Differenz aus der tatsächlichen Masse eines Atomkerns und der zusammengenommenen Massen der Protonen und Neutronen in diesem. [1, s.v. Bindungsenergie]
Blanket	Das Blanket ist der Reaktorbereich hinter der inneren Wand (First Wall). In ihm werden die schnellen Fusionsneutronen abgebremst, die durch die Kernfusionsreaktion freigesetzt werden. Ihre Bewegungsenergie wandelt sich im Blanket in Wärme um, die durch ein Kühlmittel zur Stromproduktion aus dem Reaktorinneren abgeleitet wird. Die abgebremsten Neutronen sollen im Blanket außerdem aus Lithium den Fusionsbrennstoff Tritium erzeugen. Bei der Magnetfusion schirmt eine dicke Schicht an der Rückwand des Blankets die Magnetspulen und äußere Teile der Anlage vor den Neutronen ab. [4, s.v. Blanket]
Bremsstrahlungsverlust	Bremsstrahlung ist eine kurzweilige elektromagnetische Strahlung, die bei der Abbremsung von Elektronen in Materie aufgrund der Coulomb-Wechselwirkung zwischen den Elektronen und den Atomkernen entsteht. [1, s.v. Bremsstrahlung]
Brennkammer	Hohlraum, in dem die Kernfusionsreaktion stattfindet. Hier fusionieren die Brennstoffe im Plasma zu einem neuen Element.
Brennstoffe	Ausgangsstoffe beziehungsweise Materialien, die zur Energiegewinnung eingesetzt werden. Im Bereich der Kerntechnik wird durch atomare Reaktionen, das heißt durch das Verschmelzen leichter Kerne (Fusion) oder die Spaltung schwerer Kerne (Fission) Wärme freigesetzt. [3, s.v. Brennstoff]
Coulomb-Barriere	Potentialverlauf um einen Kern. Wenn ein positives Teilchen in den Kern eindringen oder aus ihm herauskommen will, muss es diesen überwinden. Die wirksame Höhe der Coulomb-Barriere hängt außer von der Ladung von der kinetischen Energie des Teilchens und seinem Drehimpuls ab. [1, s.v. coulomb-barriere]
Direct Air Capture	CO ₂ -Entnahmetechnologie, bei der CO ₂ in technischen Anlagen mit chemischen Bindemitteln aus der Umgebungsluft aufgefangen wird. Das CO ₂ kann dann als Grundstoff eingesetzt (Carbon Capture and Usage – CCU) oder komprimiert und unterirdisch eingelagert (Carbon Capture and Storage – CCS) werden.
Derivat	Eine chemische Verbindung, die durch Abtrennung, Einführung oder Austausch von Atomen oder Atomgruppen aus einer Stammverbindung entstanden und mit dieser in Aufbau oder Eigenschaften noch verwandt ist. [1, s.v. Derivat]
Deuterium	Deuterium (D) oder „schwerer Wasserstoff“ ist ein natürliches Isotop des Wasserstoffs. Sein Atomkern besteht aus einem Proton und einem Neutron. [4, s.v. Deuterium]
Direct Drive	In der Fusionsforschung ein Verfahren der Trägheitsfusion, bei dem die Verdichtung der Brennstoffe (Kompression) über den direkten Beschuss mit Laser- oder Ionenstrahlen erfolgt.

Divertor	Bauteil des inneren Reaktors, der sich am Boden des Plasmagefäßes befindet. Es dient dazu, Verunreinigungen, die sich beispielsweise aus der inneren Reaktorwand lösen, sowie die Abbauprodukte der Kernfusionsreaktion (insbesondere Helium) aus dem Inneren des Plasmagefäßes abzuführen. Der Divertor kommt damit regelmäßig direkt in Kontakt mit dem äußeren Plasmarand. [4, s.v. Divertor]
Einschlusszeit	Auch Energieeinschlusszeit, ist in der Fusionsforschung die Zeit, innerhalb der das Plasma seinen Energieinhalt durch Transportvorgänge in seinem Inneren (Diffusion), durch Wärmeleitung und Abstrahlung verliert. [1, s.v. Energieeinschlusszeit]
klimatechnologische Technologie	Eine Technologie, die keinen Einfluss auf die globale Klimaerwärmung hat. Dies impliziert, dass netto kein Kohlendioxid (CO ₂) und auch keine anderen Treibhausgase wie beispielsweise Methan oder Lachgas freigesetzt werden. Es dürfen durch deren Verwendung keine klimaschädlichen Wirkungen auftreten. [3, s.v. klimatechnologisch]
Endlagerung	Bezeichnet die geordnete Beseitigung beziehungsweise Einlagerung (hoch)radioaktiver Abfälle entsprechend den Vorschriften des Atomgesetzes. Für die Einordnung (schwach- bis hochradioaktiv) und Entsorgung spielen neben der Aktivität der Abfallstoffe die Halbwertszeiten der Inhaltsstoffe eine wichtige Rolle. Vor der Einbringung in ein dauerhaft zu verschließendes Endlager werden hochaktive Abfälle zunächst einige Jahrzehnte intern in Kraftwerken oder externen Zwischenlagern bis zum Abklingen der Radioaktivität der kürzerlebigen Isotope zwischengelagert. [2, s.v. Endlagerung] und [1, s.v. Endlagerung]
Energiebilanz	Vergleich der Energien der Komponenten eines Systems vor und nach einem Prozess wie beispielsweise einer chemischen Reaktion oder einer Kernfusionsreaktion. [1, s.v. Energiebilanz]
Energiesouveränität	Strategische Souveränität bei der Energieversorgung ist dann gegeben, wenn hinreichende, verlässliche Energielieferungen zu wirtschaftlichen Preisen auf eine Art erfolgen, die nicht mit den eigenen Werten, Interessen und außenpolitischen Zielen in Widerspruch stehen oder diese gar gefährden. [5]
Erbrüten von Tritium	Prozess der Gewinnung des Brennstoffs im Reaktorgefäß selbst. Dabei wird Lithium durch das Einwirken der beim Fusionsprozess entstehenden Neutronen unter anderem in Tritium umgewandelt. [4, s.v. Tritium]
erneuerbare Energien	Energiequellen, die nach den Zeitmaßstäben des Menschen unendlich lange zur Verfügung stehen. [6, s.v. erneuerbare Energien]
Fast ignition	Variante der Trägheitsfusion, bei der die jeweils per Laser- oder Energieimpulse erzeugten Kompressions- und Zündungsphasen voneinander getrennt sind. Die Kernfusionsreaktion startet durch einen eigenständigen Impuls, der durch ein Loch oder eine Art Hohlkegel direkt ins Innere des zuvor komprimierten Targets geführt wird. [17]
Flexibilität (Stromversorgung)	Um trotz der schwankenden Einspeisung aus Wind- und Solarenergie Einspeisung und Entnahme im Stromnetz im Gleichgewicht zu halten, sind Technologien erforderlich, die die Schwankungen ausgleichen. Diese umfassen Speicher, flexibel betreibbare, schnell regelbare Kraftwerke sowie Verbraucher, die ihren Stromverbrauch zumindest teilweise in Zeiten mit hoher Wind- und Solarstromspeisung verschieben können.
Fossile Energieträger	Energieträger, deren Vorrat erschöpflich ist und die aus Biomasse im Laufe von Jahrtausenden unter hohem Druck und hoher Temperatur entstanden sind. Es handelt sich um Energierohstoffe mit unterschiedlichen Kohlenstoffverbindungen: Öle, Kohlen, Gase. [6, s.v. erneuerbare Energien]
gepulster Betrieb	Betriebsmodus, der nicht kontinuierlich erfolgt, sondern zeitweise unterbrochen werden muss und damit aus aufeinanderfolgenden Zeitblöcken besteht. Bei gepulsten Lasern wird das Licht in zeitlich begrenzten Dosen (Pulsen) emittiert. [4, s.v. tokamak; 7]
gestaffelte Sicherheitsebenen	In den "Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke", Abschnitt 2 (1), wird gefordert: „Es ist ein gestaffeltes [stufenweises] Sicherheitskonzept zu realisieren, das die Erfüllung der Schutzziele und die Erhaltung der Barrieren und Rückhaltefunktionen auf mehreren gestaffelten [abgestuften beziehungsweise aufeinanderfolgenden] Sicherheitsebenen sowie bei Einwirkungen von innen und außen gewährleistet.“ [8]

Großkraftwerk	Kraftwerk mit besonders hoher elektrischer Leistung – in der Regel mindestens einige hundert Megawatt (MW) oder sogar einige Gigawatt (GW), das zur Versorgung von bis zu mehreren Millionen Menschen dient. Dagegen haben kleinere Kraftwerke meist Leistungen unter 100 MW. [3, s.v. Großkraftwerk]
Grundlastkraftwerke	Grundlastkraftwerke sind Kraftwerke, die technisch gesehen in Vollzeit laufen können und bei der Stromerzeugung den Anteil der elektrischen Last (Leistung) in einem Versorgungsgebiet bereitstellen, der andauernd benötigt wird. Die darüber hinaus nicht zu allen Zeiten benötigte Leistung wird als Mittellast und Spitzenlast bezeichnet. [3, s.v. Grundlast]
Indirect Drive	In der Fusionsforschung ein Verfahren der Trägheitsfusion, bei dem sich die Brennstoffkapsel im Inneren eines Hohlraumgefäßes befindet und die Ionen- beziehungsweise Laserstrahlung in das Innere des Gefäßes geführt wird. Dort trifft es die Innenwand des Hohlraums, wodurch Röntgenstrahlung entsteht, die auf die Oberfläche des Brennstoffes gelenkt wird und diesen komprimiert und zur Zündung des Plasmas führt. [17]
Internationale Atomenergie-Organisation (IAEA)	1957 gegründete internationale Organisation zur Förderung der friedlichen Anwendung und Nutzung der Atomenergie mit Sitz in Wien. Die IAEA bildet innerhalb der Vereinten Nationen (United Nations – UN) eine eigenständige Organisation. [2, s.v. Internationale Atomenergie-Organisation (IAEA)]
Isotop	Atome ein- und desselben chemischen Elements, welche neben der gleichen Anzahl von Elektronen auch im Kern die gleiche Anzahl von Protonen, jedoch eine unterschiedliche Anzahl von Neutronen enthalten (gleiche Ordnungszahl, jedoch unterschiedliche Massenzahl). Isotope weisen die gleichen chemischen, jedoch unterschiedliche kernphysikalische Eigenschaften auf. [2, s.v. Isotop]
Kernfusion	Verschmelzung leichter Atomkerne zu schwereren. [4, s.v. Kernfusion]
Kernspaltung	Spaltung schwerer Atomkerne durch Beschuss mit Neutronen, wobei große Energiemengen freigesetzt werden. Bei der Kernspaltung entstehen jeweils zwei mittelgroße Kerne, die radioaktiven Spaltprodukte. Außerdem werden neue Neutronen frei, die weitere Kernspaltungen auslösen können. Kernspaltung kann auch spontan, das heißt ohne Anregung von außen auftreten. [2, s.v. Kernspaltung]
Kostendegression	Bei einer Kostendegression sinken die Stückkosten eines Gutes mit jeder zusätzlichen produzierten Einheit dieses Guts. Eine solche Situation liegt meist bei Produkten mit hohen Fixkosten vor. [9]
Kryostat	Thermisch isolierendes Vakuumgefäß, das einen supraleitenden Tokamak oder Stellarator umschließt. Mit Hilfe des Kryostaten werden die supraleitenden Magnete der Anlage auf Tieftemperatur gehalten. [4, s.v. Kryostat]
Laserfusion	Variante der Kernfusion, bei der eine [...] Fusion durch einen allseitigen Beschuss von kleinen (Radius = 1 mm) Brennstoffkügelchen (Pellets) mit fokussierten Laserstrahlen erreicht werden soll. [1, s.v. Laserfusion]
Lawson-Kriterium	Kriterium, welches in Fusionsreaktoren die Bedingungen zur Zündung der Kernfusion angibt. [1, s.v. Lawson-Kriterium]
Lebenszyklusanalyse	Systematische Analyse der Umweltwirkungen von Produkten während des gesamten Lebensweges. Dazu gehören sämtliche Umweltwirkungen während der Produktion, der Nutzungsphase und der Entsorgung des Produkts, sowie die damit verbundenen vor- und nachgeschalteten Prozesse (z. B. Herstellung der Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe). [10]
Magnetfeld	Das die magnetische Kraftwirkung beschreibende Feld, das jedem Punkt des Raumes und jedem Zeitpunkt einen dreidimensionalen Vektor zuordnet. [1, s.v. Magnetfeld]
Magnetfusion	Kernfusion, die technisch mittels eines Magnetfeldes realisiert werden soll. [11]
Neutronenfluenz	Die während der gesamten Lebensdauer eines Fusionskraftwerks auf einen Quadratmeter Wand des Plasmagefäßes auftreffenden Neutronen. [4, s.v. Neutronenfluenz]
Neutronenstrahlung	Neutronen sind elektrisch neutrale Elementarteilchen. Die Neutronenstrahlung besitzt ein hohes Durchdringungsvermögen und erfordert zur Abschirmung einen stärkeren Einsatz von Abschirmmaterialien. [2, s.v. Neutronenstrahlung]
Nukleon	Gemeinsame Bezeichnung für Proton und Neutron, aus welchen zusammengesetzte Kerne aufgebaut sind. [1, s.v. Nukleon]

Plasma	Den Plasmazustand bezeichnet man auch als „vierten Aggregatzustand der Materie“. Ein Plasma besteht aus zum Großteil ionisierten Atomen oder Molekülen und deren freien Elektronen. [4, s.v. Plasma]
Proliferation	Verbreitung von Atomwaffen (gelegentlich auch B- und C-Waffen) und von Kenntnissen über die Technologie ihrer Herstellung. [12, s.v. Proliferation]
radioaktiv	In der Wissenschaft bezeichnet "radioaktiv" die Eigenschaft bestimmter Atome, sich ohne äußere Einwirkung in andere Atome umzuwandeln und dabei ionisierende Strahlung auszusenden. Solche radioaktiven Atome werden Radionuklide genannt. In der rechtlichen Definition des Atomgesetzes gilt ein Stoff dagegen nur dann als "radioaktiv", wenn er eine bestimmte Aktivität (Menge an Radionukliden) enthält. [13]
Radioaktive Abfälle	Wenn für radioaktive Stoffe (nach der Definition des Atomgesetzes) keine weitere Verwendung mehr vorgesehen ist, gelten sie als radioaktive Abfälle. Radioaktive Abfälle entstehen bei der Nutzung ionisierender Strahlung in Kernkraftwerken, in der Forschung, der Industrie und in kleinen Mengen in der Medizin. [14]
- Hoch	Hochradioaktive Abfälle sind durch hohe Aktivitätskonzentrationen und damit hohe Zerfallswärmeleistungen gekennzeichnet. [2, s.v. hochradioaktive Abfälle]
- Mittel	Radioaktive Abfälle, die bei ihrer Handhabung einer zusätzlichen Abschirmung der Behälter bedürfen. [2, s.v. mittelradioaktive Abfälle]
- Schwach	Radioaktive Abfälle, die bei ihrer Handhabung keiner zusätzlichen Abschirmung der Behälter bedürfen. [2, s.v. schwachradioaktive Abfälle]
Reaktor	Anlage zur Erzeugung von Wärme aus Kernenergie [1, s.v. Reaktor]
schweres Wasser	Wasser, das statt des gewöhnlichen Wasserstoffs (H) Deuterium (D) enthält, also D ₂ O, wobei O für Sauerstoff steht. [1, s.v. schweres Wasser]
Stellarator	Bautyp einer Fusionsanlage: Stellaratoren können – anders als Tokamaks – von vorneherein im Dauerbetrieb arbeiten. In einem Stellarator wird die schraubenförmige Verdrehung der magnetischen Feldlinien ausschließlich durch äußere Spulen erzeugt. [4, s.v. Stellarator]
Stromgestehungskosten	Kosten, die für die Bereitstellung von elektrischer Energie pro Leistungseinheit (Megawatt- oder Kilowattstunde) aufgebracht werden müssen.
Supraleiter	In bestimmten Materialien fließt elektrischer Strom widerstandslos, wenn sie unter eine – meist sehr niedrige – Temperatur abgekühlt werden. Diese Materialien werden als Supraleiter bezeichnet. [4, s.v. Supraleitung]
Target	Zum Beschuss mit Beschleunigerstrahlen eingesetztes Probenmaterial. [1, s.v. Target]
Technologiereifegrad	Der Technologiereifegrad ist eine Skala von 1 bis 9 zur Bewertung des Entwicklungsstands neuer Technologien. Mit ihm lässt sich die Zeit bis zur Marktreife einer Technologie abschätzen.
Tokamak	Die am meisten untersuchte und am weitesten fortgeschrittene Bauform für den magnetischen Käfig eines Fusionsplasmas. In einem Tokamak schließen zwei sich überlagernde Magnetfelder das Plasma ein: erstens ein ringförmiges Feld, das durch äußere Spulen erzeugt wird, und zweitens das Feld eines im Plasma fließenden Kreisstroms. In dem kombinierten Feld laufen die Feldlinien dann schraubenförmig um. Zusätzlich benötigt der Tokamak noch ein drittes, vertikales Feld, das die Lage des Stromes im Plasmagefäß fixiert und den Plasmarand formt. [4, s.v. Tokamak]
Trägheitsfusion	Methode der Kernfusion, bei der der Plasmaeinschluss durch Verdichtung und Erhitzung eines kleinen Volumens durch Implosion von Hohlkugeln erzeugt wird (Trägheitseinschluss). [1, s.v. Trägheitsfusion]
Treibhausgasneutralität (auch Klimaneutralität)	Lt. Klimaschutzgesetz 2021: Gleichgewicht zwischen den anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen aus Quellen und dem Abbau solcher Gase durch Senken.
Tripelprodukt	Kombination aus Temperatur, Teilchendichte und Einschlusszeit. Das Tripelprodukt ist ein Maßstab dafür, wie nah das Plasma den Bedingungen für eine sich selbst erhaltende Kernfusion kommt. [26]
Tritium	Tritium (T) oder „überschwerer Wasserstoff“ ist ein Isotop des Wasserstoffs. Sein Atomkern besteht aus einem Proton und zwei Neutronen. [4, s.v. Tritium]
Wasserstoffbombe	Auf einer unkontrollierten thermonuklearen Reaktion vornehmlich durch die Verschmelzung von Deuterium und Tritium sowie Lithium zu Helium beruhende Waffe. [1, s.v. Wasserstoffbombe]

Zusammenfassung

Stand der Kernfusionsforschung

Mit der Kernfusion sind zahlreiche Hoffnungen auf eine versorgungssichere und klimafreundliche Energieversorgung verbunden. Dazu haben neben der Notwendigkeit zum Verzicht auf fossile Energien auch verschiedene Forschungserfolge in den letzten Jahren beigetragen, unter anderem an Testanlagen des NIF (USA), am JET (Großbritannien), EAST (China) und Wendelstein 7-X (Deutschland). Dennoch bewegt sich die Forschung zur Kernfusion weiterhin vorrangig im Bereich der Grundlagenforschung, auch wenn bei einigen Komponenten ein Übergang zur angewandten Forschung stattfindet (zum Beispiel bei Lasern, supraleitenden Magneten und Plasmaheizungen).

Von einem regulären Kraftwerksbetrieb ist die Kernfusion noch weit entfernt: Für keines der Fusionskonzepte existiert ein Kraftwerksprototyp. Zudem gilt es aufzuzeigen, dass eine solche Anlage nicht nur im kommerziellen Maßstab technisch möglich, sondern auch wirtschaftlich tragfähig ist. Die Herausforderungen bis zu einer Realisierung sind somit groß. Viele Fachleute rechnen mit einem ersten Kraftwerksprototypen beziehungsweise kommerziellen Kraftwerk erst in 20 bis 25 Jahren. Dafür müsste die Kernfusionsforschung weiterhin gefördert, müssten die notwendigen Entwicklungen parallel vorangetrieben werden und alle Beteiligten intensiv kooperieren. Teilweise werden auch kürzere Realisierungszeiträume von 10 bis 15 Jahren angekündigt, insbesondere aus dem Start-up-Bereich. Nach derzeitigem Forschungsstand sind diese Zeiträume bis zum ersten Kraftwerk allerdings nicht wahrscheinlich. Um die gesetzlich verankerten Klimaziele sowie die Treibhausgasneutralität in Deutschland bis 2045 beziehungsweise in Europa bis 2050 zu erreichen, könnte die Kernfusion daher keinen oder bestenfalls einen späten und damit geringen Beitrag erbringen. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts könnten Fusionskraftwerke hingegen zum Einsatz kommen, um den voraussichtlich weiter steigenden globalen Strombedarf zu decken.

Chancen und Herausforderungen

Eine erfolgreiche Umsetzung der Kernfusion brächte verschiedene Vorteile mit sich: Mit den Kraftwerken stünde eine weitere emissionsarme Technologie zur Stromerzeugung zur Verfügung, die die Versorgung mit erneuerbaren Energien ergänzen könnte. Anders als bei fossilen Kraftwerken und der Kernspaltung könnten die Brennstoffe vor Ort hergestellt werden und wären über lange Zeiträume verfügbar, wodurch eine geringere Abhängigkeit von Exportländern bestünde. Gegenüber der Kernspaltung weist die Kernfusion ein geringeres Risikopotenzial auf, unter anderem, weil nicht die Gefahr einer unkontrollierbaren Kettenreaktion besteht. Als weitere allgemeine Vorteile werden von Fachleuten oft der geringe Flächenbedarf sowie die Chance auf den Export dieser komplexen Hochtechnologie oder auch einzelner Kraftwerkskomponenten genannt. Wirtschaftliche Chancen und damit eine mögliche Reduktion von Investitionsrisiken bietet zudem die Verwendung der entwickelten Hochtechnologiekomponenten in weiteren Bereichen, wie beispielsweise der Medizin, Optik, Diagnostik, Robotik und Raumfahrt.

Demgegenüber stehen die hohen Investitionen, die zunächst für die Entwicklung und später auch für den Bau von Fusionskraftwerken, die aller Voraussicht nach Großprojekte sein werden, notwendig sind. Die Kraftwerke müssen außerdem zeigen, dass sie innerhalb der Energieversorgungslandschaft in der Mitte des 21. Jahrhunderts betriebswirtschaftlich wettbewerbsfähig sind. Angesichts der noch zu lösenden technischen Herausforderungen ist bezüglich des Zeitraums zu berücksichtigen, dass sich die Entwicklung der Kraftwerke verzögern könnte oder im schlimmsten Fall ein dauerhafter Betrieb nicht gelingt. Ähnlich wie bei

Kernspaltungskraftwerken entstehen in der Regel auch bei Fusionskraftwerken radioaktive Abfälle, diese wären allerdings nicht hochradioaktiv und müssten nicht länger als rund 100 Jahre eingelagert werden.

In der Gesamtschau erscheint ein weiteres Engagement für die Kernfusion sinnvoll. Dieses darf jedoch nicht die Bemühungen und Maßnahmen für die Transformation des Energiesystems hin zur Treibhausgasneutralität bis 2045 beziehungsweise 2050 vermindern. Vielmehr sollten sich beide Strategien ergänzen und so gemeinsam zu einem langfristig gesicherten, souveränen Industriestandort Deutschland und Europa beitragen.

Kernfusion als Teil eines klimaneutralen Energiesystems

Gelingt die kommerzielle Einführung, könnte die Kernfusion ab der zweiten Hälfte des Jahrhunderts wegen ihres geringen CO₂-Ausstoßes Teil eines klimafreundlichen Stromsystems sein. Ob sich die Kernfusion gegenüber erneuerbaren Energien und anderen emissionsarmen Technologien am Strommarkt durchsetzen könnte, hängt von den Kosten ab, zu denen Fusionskraftwerke Strom bereitstellen würden. Systemstudien, die nicht nur die anlagenbezogenen Stromgestehungskosten, sondern die gesamten Systemkosten inklusive Speicher, Netzen und anderen Infrastrukturen berücksichtigen, kommen zum Ergebnis, dass die Kernfusion nur zur Senkung der Systemkosten beitragen würde, wenn ihre Stromgestehungskosten den unteren Bereich der heute für sie prognostizierten Bandbreite erreichen würden. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums und der noch zu lösenden Herausforderungen der Kernfusion entsprechende Abschätzungen gegenwärtig mit einer hohen Unsicherheit verbunden sind. Ebenfalls im Auge zu behalten ist bei dieser Bewertung der Verlauf der Kosten weiterer Technologien zur klimaneutralen Energieversorgung, weil deren Entwicklung mögliche wirtschaftliche Einsatzbereiche der Kernfusion deutlich beeinflussen wird.

Fusionskraftwerke würden um 2050 herum in Deutschland und Europa voraussichtlich auf ein weitreichend umgestaltetes Energiesystem treffen, das dezentraler organisiert sein und auf erneuerbaren Energien basieren wird. Sofern genügend Flexibilität in den Systemen vorhanden ist – etwa durch Strom- und Energiespeicher, eine gezielte Verbrauchssteuerung (Lastmanagement) und eine stärkere Digitalisierung –, ließen sich Fusionskraftwerke in das System integrieren. Eine Notwendigkeit für eine sichere und verlässliche Energieversorgung der Zukunft stellen sie nach heutigem Kenntnisstand laut Systemstudien jedoch nicht dar. Inwieweit eine Verfügbarkeit von Fusionskraftwerken die Entwicklung des Energiesystems über 2050 hinaus beeinflussen könnte, ist aus heutiger Perspektive schwer abschätzbar. In der Betriebsweise würden sie aufgrund des hohen Investitionsbedarfs voraussichtlich heutigen Grundlastkraftwerken ähneln und dementsprechend vor allem für Anwendungen eingesetzt werden, die mit einer steten Energienachfrage verbunden sind. Solche hohen Nachfragen können beispielsweise dicht besiedelte Regionen oder Industriezentren oder die Herstellung von Wasserstoff und gegebenenfalls auch seiner Derivate in Deutschland beziehungsweise innerhalb Europas generieren. In Ländern, die in ihrem Energiesystem weiterhin verstärkt auf Großkraftwerke setzen werden, könnten Fusionskraftwerke insbesondere Kernkraftwerke sukzessive ersetzen.

Finanzierung und Regulierung – zwei entscheidende Faktoren auf dem Weg zu Kraftwerken

Bei der Kernfusion handelt es sich um eine komplexe und forschungsintensive Technologie, die über die bereits erfolgte umfangreiche Förderung hinaus nur mit weiteren erheblichen Forschungsmitteln aus dem staatlichen wie privaten Bereich realisiert werden kann. Zu deren Bereitstellung trägt die steigende Zahl an Start-ups bei, die sich einer kommerziellen Umsetzung der Kernfusion verschrieben haben. Sie werben nicht nur zusätzliche Forschungs- und Entwicklungsgelder von privaten Investoren ein, sondern erweitern auch die Bandbreite an möglicherweise einsetzbaren technischen Lösungskonzepten.

Für die Realisierung von Fusionskraftwerken bedarf es der Einführung eines verlässlichen Rechtsrahmens. Das umfasst die Zuordnung von Zuständigkeiten zu Regulierungs- und Aufsichtsbehörden sowie die Setzung von Standards zur Genehmigung und zum Betrieb von Kernfusionsanlagen. Einzubeziehen sind dabei auch Sicherheits-, Arbeitsschutz- und Umweltaspekte, die beispielsweise den Umgang mit giftigen und radioaktiven Stoffen regeln. Die Fusionscommunity plädiert für eine fusionsspezifische Regulierung und spricht sich aufgrund des geringeren Gefahrenpotenzials im Vergleich zur Kernspaltung gegen eine Verregelung aus, die eng an die von Kernkraftwerken angelehnt ist. Weil ein entsprechender Rechtsrahmen bisher nicht existiert und die Kernfusion eine Technologie in der Entwicklung ist, muss die Erarbeitung iterativ gestaltet werden, um neu hinzugekommene Erkenntnisse einbeziehen und gegebenenfalls nachsteuern zu können.

Einleitung

Der Umbau des Energiesystems hin zu einer klimaneutralen Versorgung für die zweite Hälfte dieses Jahrhunderts stellt die Energiewirtschaft vor große Herausforderungen. Nichtfossile Quellen und neue Verfahren zur Bereitstellung von Strom, Wärme und Energieträgern wie zum Beispiel Kraftstoffen sind gefragt. Neben den verschiedenen erneuerbaren Energien (vor allem Photovoltaik, Windenergie auf Land und zur See, Wasserkraft, Geothermie) taucht dabei zunehmend eine weitere Technologie als ein möglicher Baustein einer zukünftigen Energieversorgung in der öffentlichen Debatte auf: die Kernfusion.

Seit mehreren Jahrzehnten arbeitet die Forschung daran, mit technischen Lösungen die Prozesse des Verschmelzens von Atomkernen, wie sie tagtäglich in der Sonne stattfinden, auf der Erde umzusetzen. Das Ziel ist dabei, die Energie, die bei den Kernfusionsprozessen entsteht, für die Versorgung der Menschen nutzbar zu machen. Die grundsätzlichen physikalischen Prozesse, die hinter der Kernfusion stehen, sind dabei weitgehend verstanden. Eine technische Umsetzung erweist sich jedoch als herausfordernd und so gibt es bisher weltweit noch kein kommerzielles Fusionskraftwerk oder einen Prototyp für ein solches.

Trotz des begrenzten Entwicklungsstands der Technologie und dem weiterhin großen Forschungsbedarf sind die Erwartungen zum Teil sehr groß, dass die Kernfusion in Zukunft einen wichtigen Teil der Energieversorgung übernehmen kann. Genährt wird diese Hoffnung auch durch Forschungserfolge, über die in den zurückliegenden Jahrzehnten – mal mit einer geringeren und mal mit einer größeren Aufmerksamkeit – medial berichtet wurde. Doch wo steht die Forschung zur Kernfusion aktuell? Welche Möglichkeiten für Unternehmen und die Energieversorgung würden sich ergeben, wenn ihre Umsetzung gelingt? Welche Herausforderungen müssen bis dahin noch bewältigt werden? Diesen und weiteren Fragen widmet sich das vorliegende Impulspapier. Es geht darüber hinaus darauf ein, in welchem Zeitrahmen die Realisierung eines Fusionskraftwerks aus heutiger Sicht gelingen könnte, wie sich kommerzielle Fusionskraftwerke in ein zukünftiges Energiesystem einbetten würden und welche Schutzanforderungen damit einhergehen, wenn sie einsetzbar wären.

In diesem Papier liegt die Aufmerksamkeit auf der zivilen, energiewirtschaftlichen Nutzung der Kernfusion. Betrachtet werden die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten von Forschungseinrichtungen und Start-ups, die sich zum Ziel gesetzt haben, ein Fusionskraftwerk zur Gewinnung von Strom und gegebenenfalls Abwärme zur Anwendungsreife zu bringen. Ausgangspunkt für die vorliegende Publikation war ein Workshop im Rahmen des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS) mit führenden Fachleuten von universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen sowie Start-ups.¹ Die Erkenntnisse aus dem Workshop sowie Studien und Fachartikel aus den Forschungsbereichen Kernfusion und Energiesysteme bilden zusammen mit ergänzenden Einschätzungen von Expert*innen die Grundlage dieser Publikation.

Statt von Kernfusion wird in der deutschsprachigen Forschungscommunity teilweise von Fusion oder Fusionsenergie gesprochen. Dies soll unter anderem dazu beitragen, die Technologie von der bereits existierenden Kernspaltung, also von Atomkraftwerken abzugrenzen. In diesem Papier wird bei der Verwendung

¹ Der Workshop fand am 13. April 2023 in Berlin statt. Teilgenommen haben: Stephanie Dachsberger (acatech Geschäftsstelle), Prof. Dr. Tony Donné (EUROfusion), Prof. Dr.-Ing. Manfred Fischedick (ESYS-Direktorium | Wuppertal Institut), Prof. Dr. Dr. h.c. Siegfried H. Glenzer (SLAC - National Accelerator Laboratory (Universität Stanford)), Dr. Ulrich Glotzbach (acatech Geschäftsstelle), Prof. Dr. Sibylle Günter (Max-Planck-IPP/ EUROfusion), Prof. Dr. Constantin Häfner (Chair for Laser Technology, RWTH Aachen | Fraunhofer Institut für Lasertechnik| Fraunhofer Gesellschaft), Prof. Dr. Hans-Martin Henning (ESYS-Direktorium | Fraunhofer ISE), Dr. David Kingham (Tokamak Energy), Dr. Heinz-Ullrich Kraft (FILO), Dr. Frank Laukien (Bruker Corporation | Gauss Fusion Initiative), Dr. Andrea Lübecke (acatech), Daniela Niethammer (ESYS-Koordinierungsstelle), Prof. Dr. Karen Pittel (ESYS-Direktorium | ifo Institut), Prof. Dr. Hermann Requardt Gauss Fusion Initiative | acatech), Prof. Dr. Markus Roth (Focused Energy | TU Darmstadt), Milena Roveda (Gauss Fusion Initiative), Prof. Dr. Dirk Uwe Sauer (ESYS-Direktorium | RWTH Aachen), Dr. Cyril Stephanos (ESYS-Koordinierungsstelle), Prof. Dr. Jan Wörner (acatech), Sven Wurbs (ESYS-Koordinierungsstelle). Das vorliegende Papier gibt nicht die Einschätzung einzelner Workshopteilnehmer*innen wieder. Es wurde von den für das Papier genannten Autor*innen im Nachgang des Workshops unter anderem unter Berücksichtigung der Workshopergebnisse verfasst.

des alleinstehenden Begriffs dennoch weiterhin das Wort Kernfusion genutzt, da physikalische Wechselwirkungen in den Atomkernen die Grundlage der Technologie bilden und der Begriff zugleich die Anschlussfähigkeit an die allgemeine öffentliche Diskussion sicherstellt. Zur besseren Lesbarkeit wird jedoch bei zusammengesetzten Begriffen in der Regel die Kurzform „Fusion“ verwendet.

1 Grundlagen

1.1 Wie kommt es zur Kernfusion?

Bei der Kernfusion verschmelzen leichte Atomkerne – zum Beispiel des Wasserstoffs – miteinander, sodass neue Elemente mit einer höheren Anzahl an Teilchen in ihrem Kern (Nukleonen)² entstehen (siehe Abbildung 1). Eine Kernfusion setzt Energie frei, da der entstandene Kern eine geringere Masse als die Summe der Ausgangsatomkerne aufweist (sogenannter Massendefekt). Die auftretende Bewegungsenergie der Teilchen wird durch Wechselwirkung mit anderen Teilchen oder durch Strahlungsverluste in Wärme umgewandelt. Dieser Prozess findet in der Sonne fortlaufend statt, auf der Erde auf natürliche Weise hingegen nicht. Die Fusionsforschung hat sich daher zum Ziel gesetzt, diesen Prozess auf der Erde technisch nutzbar zu machen.

Eine Kernfusionsreaktion benötigt zum Start ausreichend Energie, denn die Atomkerne müssen sich sehr nahekommen. Um fusionieren zu können, müssen sie nämlich erst die Abstoßungskräfte zwischen den positiv geladenen Kernen überwinden (Coulomb-Barriere). Eine Möglichkeit besteht darin, dass sich die Kerne mit sehr hoher Geschwindigkeit aufeinander zubewegen. Das geschieht zum Beispiel in einer Umgebung mit extrem hoher Temperatur (mehrere Millionen Grad Celsius). Die Teilchen bilden dabei ein sogenanntes Plasma.³ Sind die Abstoßungskräfte überwunden, verschmelzen die Kerne miteinander und bilden ein neues Element. [15; 16; 17]

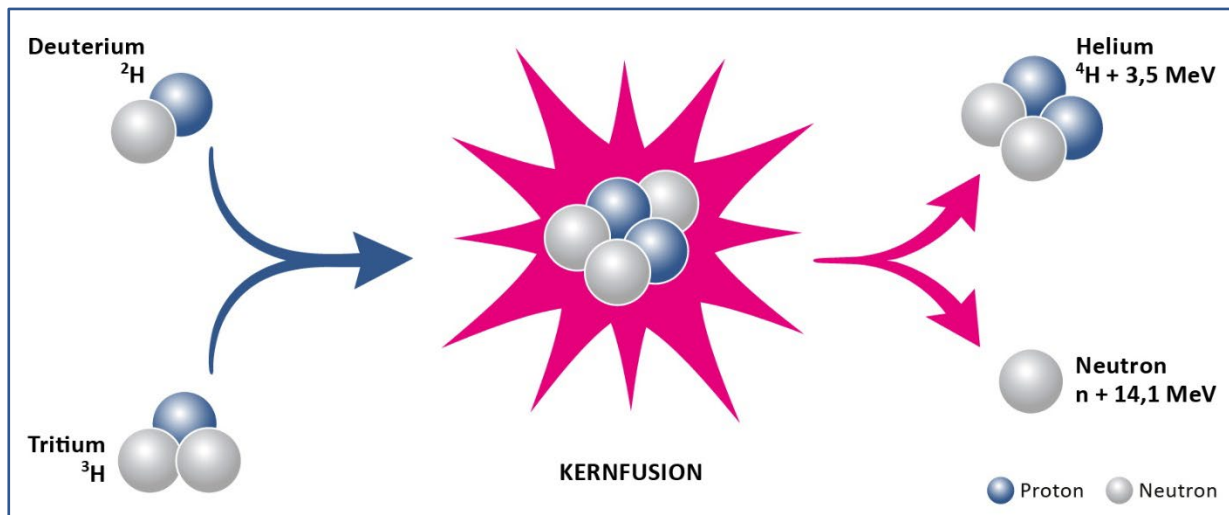


Abbildung 1: Prinzip der Kernfusion am Beispiel der Bildung von Helium (${}^4\text{He}$) aus den Wasserstoffisotopen Deuterium (${}^2\text{H}$) und Tritium (${}^3\text{H}$), wobei auch ein Neutron (n) mit einer charakteristischen Energie von 14,1 MeV (Megaelektronenvolt) frei wird. Das Alphateilchen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

² Nukleonen sind die Teilchen, die den Atomkern bilden. Dazu zählen die Protonen (positiv geladene Teilchen) und die Neutronen (neutrale Teilchen), wobei die Massenzahl (links hochgestellt) deren Gesamtanzahl im Atomkern angibt.

³ Der Plasmazustand wird häufig auch als vierter Aggregatzustand bezeichnet, neben fest, flüssig und gasförmig. Im Plasma liegen Atome in ionisierter Form vor und Elektronen sind frei beweglich.

Für Kernfusionsprozesse auf der Erde müssen höhere Temperaturen erreicht werden, als sie in der Sonne vorherrschen. Der Grund ist, dass im Inneren der Sonne ein hoher Druck existiert. Da die Teilchendichte mit dem Druck zunimmt, reichen dort bereits niedrigere Temperaturen für eine Kernfusion aus. Das spiegelt sich im sogenannten Lawson-Kriterium wider. Es definiert die Bedingungen für eine sich selbst erhaltende Kernfusionsreaktion in Form eines bestimmten Verhältnisses aus der Temperatur des Plasmas, der Teilchendichte im Plasma und der Einschusszeit⁴ des Plasmas [18; 19; 20; 21].

1.2 Unterschied Kernfusion und Kernspaltung

Obwohl es sich bei beiden Techniken um die Freisetzung von Bindungsenergie aus Atomkernen handelt, gibt es einen wesentlichen Unterschied zwischen Kernfusion und Kernspaltung:

Bei der Kernfusion wird Energie freigesetzt, indem leichte Atomkerne, das heißt Kerne mit einer geringen Anzahl an Nukleonen, miteinander verschmelzen (siehe Abbildung 2). Es entstehen Elemente mit einer höheren Nukleonenzahl und damit einer höheren Bindungsenergie im Kern.

- Im Gegensatz dazu wird bei der **Kernspaltung** Energie durch den Prozess der Spaltung von schweren Atomkernen, die eine hohen Nukleonenzahl aufweisen, freigesetzt. Als Produkte entstehen hierbei Elemente mit einer geringeren Zahl an Nukleonen im Atomkern.

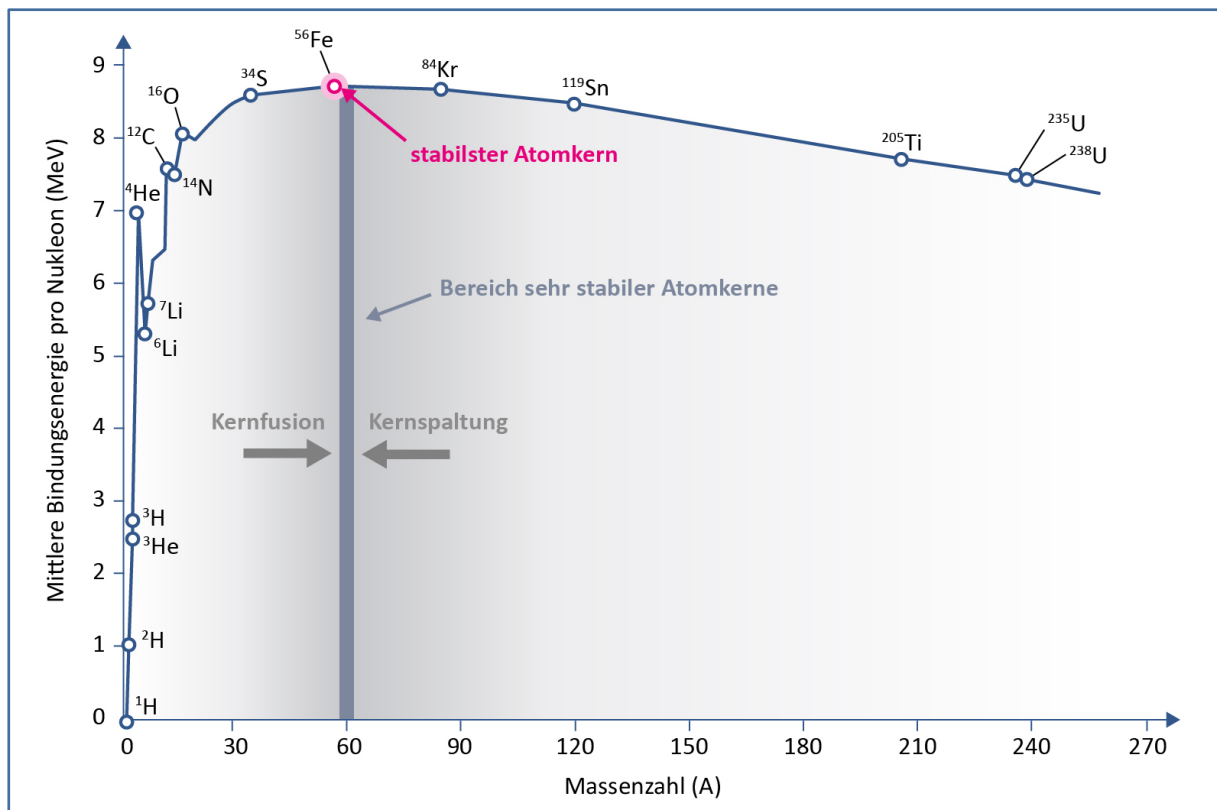


Abbildung 2: Einordnung der Kernfusion und Kernspaltung anhand der Teilchen im Kern (Massenzahl): Kernfusion findet unter Elementen mit einer geringen Zahl an Nukleonen⁵ statt, Kernspaltung hingegen bei Elementen mit vielen Nukleonen. Eisen-56 (⁵⁶Fe) bildet dabei den Kern, der die höchste Bindungsenergie aufweist und zugleich stabil ist. Quelle: angepasst an LibreTexts, CC BY 4.0 Deed [22].

⁴ Die Einschusszeit gibt an, in welcher Zeit das Plasma seinen Energieinhalt an seine Umgebung abgibt. Bei der Trägheitsfusion wird bei einer Plasmadichte von circa 10²⁵ cm⁻³ eine Energieeinschlusszeit von 10⁻⁹ Sekunden benötigt. Bei der Magnetfusion ist es bei einer Plasmadichte von 10¹⁴ cm⁻³ 1 Sekunde. [18]

⁵ Die Massenzahl (links hochgestellt) gibt die Gesamtanzahl der Nukleonen (Protonen und Neutronen) im Atomkern an.

Anders als bei der Kernspaltung, bei der eine Kettenreaktion in der Regel durch aktives Handeln unterbunden werden muss, ist bei der Kernfusion eine unkontrollierbare **Kettenreaktion ausgeschlossen**. Sind die Drücke oder Temperaturen geringer als benötigt, erlischt die Kernfusionsreaktion innerhalb kürzester Zeit von allein. Hinzu kommt, dass die radioaktiven Abfälle, die bei den Kernfusionsreaktionen entstehen, anders zusammengesetzt sind: Im Vergleich zur Kernspaltung fallen hochradioaktive Abfälle in der Regel dort nicht an. Die Gefahren durch entstehende Rest- beziehungsweise Nachzerfallswärme sind begrenzt, weil in potenziellen Fusionskraftwerken die Brennstoffe stetig der Reaktorkammer zugeführt oder durch den Reaktor zunächst selbst erzeugt werden. Durch den schnellen Abbruch der Kernfusionsreaktion und ohne weiteren Brennstoff können anders als bei Kernspaltungskraftwerken somit keine radioaktiven Kerne mehr entstehen, die Nachzerfallswärme abgeben und entsprechend systematisch gekühlt werden müssen.

INFO: Was unterscheidet Kernfusion und Kernspaltung?

	Kernfusion (engl. fusion)	Kernspaltung (engl. fission)
Prozess	<ul style="list-style-type: none"> • Verschmelzung 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: Helium (^4He) + Neutron 	<ul style="list-style-type: none"> • abhängig vom Brennstoff • Beispiel: Uran* (^{235}U): Vielzahl radioaktiver Stoffe (u. a. Strontium* (^{90}Sr), Cäsium* (^{137}Cs), Barium* (^{145}Ba)), Neutronen und Elektronen
Temperatur/Energiegewinnung	<ul style="list-style-type: none"> • zunächst sehr hohe, extern bereitzustellende Ausgangstemperaturen zum Start der Reaktion erforderlich (etwa 100 Millionen Grad Celsius) • Kernfusion setzt Bewegungsenergie/Wärme frei, die zur Energiegewinnung genutzt wird 	<ul style="list-style-type: none"> • circa 290–1.000 Grad Celsius im Primärkreislauf⁶ [23; 24] • 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 in der Regel niedrig bis mittelfach radioaktiver Abfall, das heißt Lagerung in Größenordnung von circa 100 Jahren [20; 17; 100] 	<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 Jahre⁷

Tabelle 1: Unterschiede zwischen Kernfusion und Kernspaltung

*radioaktiv

6 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 [23; 24].

7 Standortauswahlgesetz, § 1.2

2 Technologiekonzepte und Brennstoffe

Um die Kernfusion für die Energiegewinnung einsetzen zu können, konzentriert sich die Forschung allgemein auf zwei grundlegende Technologieansätze: die Magnet- und die Trägheitsfusion. Zu Letzterer zählt vor allem die Laserfusion. Bei beiden Ansätzen können grundsätzlich die gleichen Brennstoffe zur Anwendung kommen und es wird sich jeweils um thermische Kraftwerke handeln (siehe Abbildung 3). Während der Kernfusionsreaktion werden in der Regel Neutronen freigesetzt, die dann von der Innenwand des Reaktorgefäßes abgebremst und eingefangen werden. Ihre Bewegungsenergie wird somit in Wärme umgewandelt und diese anschließend an einen Wärmetauscher beziehungsweise Wärmekreislauf abgegeben, aus dem heraus dann Wasserdampf erzeugt wird und über Turbinen zur Stromerzeugung durch Generatoren genutzt werden kann. [17; 25; 26; 20]

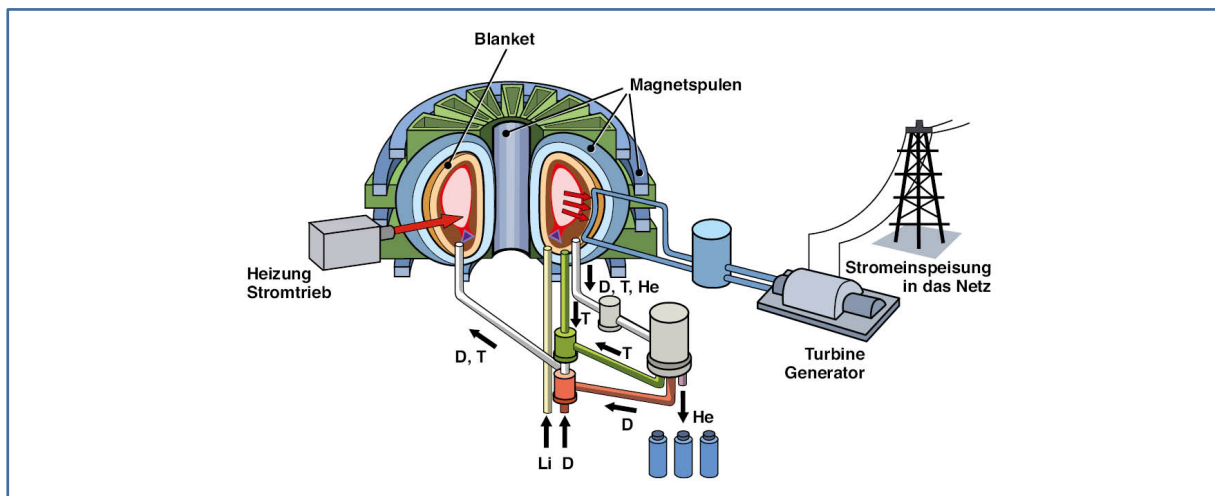


Abbildung 3: Aufbau eines Fusionskraftwerks am Beispiel der Magnetfusion mit den Stoffen, die im Rahmen des Brennstoffkreislaufs eingesetzt werden, beziehungsweise entstehen: Lithium (L), Deuterium (D), Tritium (T) und Helium (He). Quelle: MPI für Plasmaphysik, Karin Hirl [27]

2.1 Magnetfusion

Bei der **Magnetfusion** (Magnetic Confinement Fusion – MCF) befindet sich der Brennstoff für die Fusionsreaktion in einem Plasma, das durch starke Magnetfelder im Reaktor eingeschlossen wird. Eine externe Heizung erhitzt es für einige Sekunden auf über 100 Millionen Grad Celsius, sodass das Gemisch zünden kann. Für die Zündung stellt die Heizung dafür kurzzeitig rund 50 bis 100 Megawatt an Energie bereit. [28] Wenn dann genügend Atomkerne miteinander fusionieren, entsteht so viel Wärme, dass das Plasma sich selbst erhält und die Heizsysteme abgeschaltet werden können. Durch den Magneteinschluss werden nicht nur die geladenen Plasmateilchen im Reaktorgefäß eingeschlossen, sondern es wird auch verhindert, dass das Plasma die Innenwand des Reaktorgefäßes berührt, was zu einer sehr schnellen Abkühlung des Plasmas und damit der Beendigung des Plasmazustands führen würde. Ein Kontakt des Plasmas mit der Innenwand könnte diese darüber hinaus beschädigen. [21; 25; 26; 28] Wegen der längeren Einschlusszeit bei gleichem Temperaturniveau muss das Plasma im Gegensatz zur Trägheitsfusion nicht verdichtet werden.⁸ [17]

⁸ Die Drücke sind bei der Magnetfusion rund einhundert Milliarden Mal geringer als bei der Trägheitsfusion und bewegen sich im Plasma im Bereich zwischen 3 und 7 bar. Entsprechend sind Magnetfusionsanlagen großvolumige Anlagen mit rund 1.000 Kubikmetern Brennkammerolumina. [17]

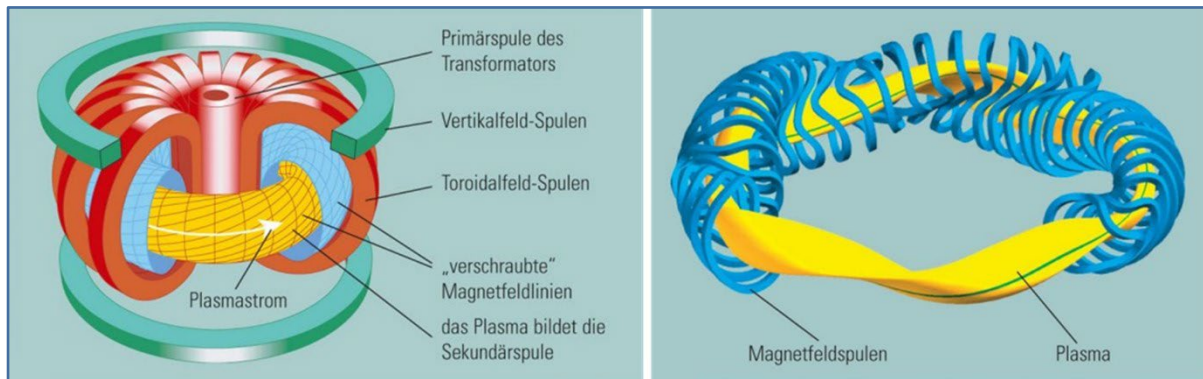


Abbildung 4: Vergleichende Darstellung des Designs eines Tokamaks (links) und eines Stellarators (rechts). Quelle: © Wengenmayr, R. | MPI für Plasmaphysik / CC BY-NC-ND 4.0 [29]

Der **Tokamak** und der **Stellarator** bilden bisher die zwei vielversprechendsten Reaktortypen der Magnetfusion. Bei beiden wird das Plasma durch Magnete in einem ringförmigen Reaktorgefäß gehalten. Die Geometrie der Magnetfelder, die die Brennkammer durchdringen, unterscheidet sich jedoch.

- Beim **Tokamak** wird das Plasma durch drei sich überlagernde Magnetfelder gehalten. Das erste Magnetfeld wird von den Magnetspulen erzeugt, die das torusförmige Reaktorgefäß umschließen, sodass sich ein ringförmiges Magnetfeld bildet (siehe Abbildung 4). Um zu verhindern, dass das Plasma die Reaktorwand berührt, ist ein zweites Magnetfeld notwendig, das einen im Plasma fließenden elektrischen Strom erfordert, der über eine im Inneren des Tokamak platzierte Transformatorspule erzeugt wird. Als drittes schließen Vertikalspulen den Plasmastrom mit ihrem Magnetfeld nach oben und unten ein. Dem vergleichsweise einfachen Aufbau steht entgegen, dass nach einiger Zeit die für den inneren Stromfluss zuständige Transformatorspule aus- und wieder eingeschaltet werden muss. Tokamaks werden daher aktuell nicht im Dauerbetrieb, sondern mit Unterbrechungen im sogenannten gepulsten Betrieb gefahren. Perspektivisch sollen Pulsdauern von mehreren Stunden erreicht werden⁹ und es gibt darüber hinaus Forschungsideen, wie auch ein Dauerbetrieb erreicht werden könnte. [30; 31; 32; 33; 34]
- Der **Stellarator** kann hingegen im Dauerbetrieb gefahren werden, denn das gesamte Magnetfeld wird durch sehr speziell angeordnete externe Magnetspulen erzeugt, die eine Transformatorspule unnötig machen. Die dafür notwendige Spulenanordnung ist allerdings so komplex, dass sie erst durch Simulationen mit Großrechnern realisiert werden konnte. Außerdem fallen die Anforderungen an die Plasmakontrolle etwas geringer aus. [35; 25; 36]

2.2 Trägheitsfusion

Beim Konzept der **Trägheitsfusion** (Inertial Confinement Fusion – ICF) bringen hochenergetische Laser- oder Ionenstrahlen die notwendige Energie in ein Target ein. Beim Target handelt es sich um eine Kugel von mehreren Millimetern Durchmesser aus den tiefgefrorenen Brennstoffen, die miteinander fusionieren sollen. Von Trägheitsfusion wird gesprochen, weil die Massenträgheit entscheidend für die Zündung des Plasmas ist (siehe Abbildung 5). Sie sorgt dafür, dass während des sehr kurzen, intensiven Energiebeschusses

⁹ In der Primärsule eines Transformators muss der Stromfluss veränderlich sein, um eine Spannung zu erzeugen. Dieser Stromfluss kann allerdings nur für eine begrenzte Zeit ansteigen und erfordert folglich die Unterbrechung durch ein Aus- und Wiedereinschalten beziehungsweise ein gezieltes Herunterfahren. Für Demonstrations- beziehungsweise kommerzielle Kraftwerke nach dem Tokamak-Prinzip werden Pulsdauern von circa 1 bis 2 Stunden angestrebt [30; 31]. Durch Beeinflussung des Heizmechanismus des Plasmas (Electron Cyclotron Current Drive; Lower Hybrid Current Drive) lässt sich perspektivisch möglicherweise der Plasmastrom auch im Tokamak verstetigen, was gegebenenfalls einen Dauerbetrieb ermöglichen würde [32; 33; 34].

der Brennstoff unter der äußeren Schicht des Targets so stark komprimiert wird, dass die benötigten Temperaturen (> 100 Millionen Grad Celsius), Drücke (hunderte Gigabar) und Dichten (> 1.000 -fache Festkörperdichte) entstehen, um das Plasma zu zünden. Im Gegensatz zur Magnetfusion werden die Fusionsbedingungen jeweils nur für einen sehr kurzen Zeitraum – in der Regel wenige Nanosekunden lang – erreicht. [17; 37]

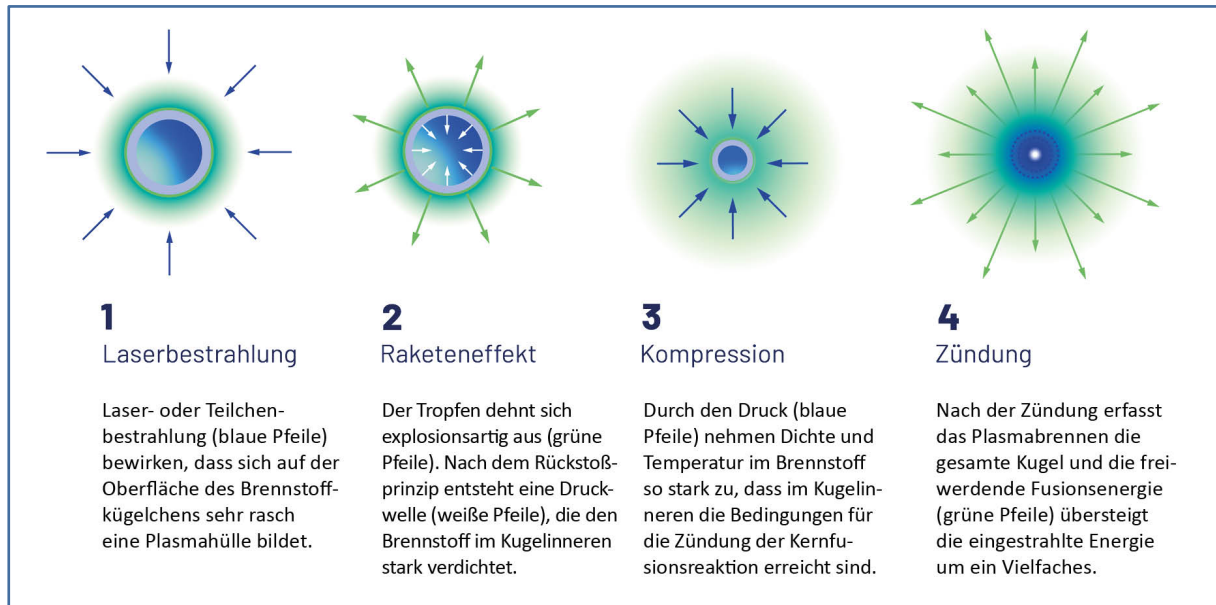


Abbildung 5: Ablaufschema der Trägheitsfusion (ICF). Quelle: Grafik FOCUSED ENERGY [38] mit geänderten Texten.

Die Forschung verfolgt gegenwärtig **verschiedene Grundkonzepte** und Ansätze der Trägheitsfusion. Am weitesten fortgeschritten ist das sogenannte Indirect-drive-Verfahren (IDD), zum Einsatz in Testanlagen kommen unter anderem aber auch Direct drive (DD), Fast ignition (FI) und Shock ignition (SI). [17; 21; 39]

- Beim Ansatz **Indirect drive** befindet sich das Target mittig in einem Behälter. Durch Wandöffnungen dringen die Laserstrahlen ins Innere. Wenn sie auf die Innenwand treffen, entsteht Hohlraumstrahlung (Röntgenstrahlung), die das Target gleichmäßig verdichtet, bis es zur Zündung kommt.
- Beim **Direct drive** beschießen die Laserstrahlen die Brennstoffkugel von vielen Seiten direkt. Für eine gleichmäßige Kompression und die Zündung braucht eine symmetrische Energieverteilung, das heißt, die Strahlen müssen die Brennstoffkugel von allen Seiten sehr genau zur gleichen Zeit treffen. [40; 17]
- Beim Verfahren **Fast ignition** sind die jeweils per Laser- oder Energieimpulse erzeugten Kompressions- und Zündungsphasen voneinander getrennt. Die Kernfusionsreaktion startet durch einen eigenständigen Impuls, der durch ein Loch oder eine Art Hohlkegel direkt ins Innere des zuvor komprimierten Targets geführt wird.
- Beim Ansatz **Shock ignition** wird die Kompression per Laserimpuls ebenfalls separat herbeigeführt. Zur Zündung kommt es anschließend durch einen schockartigen, hochenergetischen Impuls, der anders als bei der Fast ignition das Target außen statt direkt im Inneren trifft.

2.3 Brennstoffe

Bei der Magnet- und Trägheitsfusion können die gleichen Brennstoffe zur Anwendung kommen. Je mehr Protonen sich in deren Atomkernen befinden, desto höher sind die elektrischen Abstoßungskräfte zwischen den Kernen und desto mehr Energie muss eingangs zu deren Überwindung aufgebracht werden. Die reaktionsfreudigste Kernfusion mit den geringsten Ansprüchen an das Verhältnis aus Plasmatemperatur, Einschlusszeit und Druck ist die der zwei Wasserstoffisotope¹⁰ **Deuterium** (D/²H) und **Tritium** (T/³H). [41] Sie sind daher die am häufigsten verwendeten **Brennstoffe** bei Fusionsexperimenten und besitzen aus heutiger Sicht laut Expert*innen die größte Wahrscheinlichkeit, in einem Fusionskraftwerk zur Anwendung zu kommen. Keine andere Kernfusionsreaktion erreicht bei so „niedrigen“ Temperaturen das Maximum ihrer Reaktionsrate (siehe Abbildung 6). Außerdem ist bei der Deuterium-Tritium-Reaktion das Verhältnis aus Energieausbeute und Energieeintrag theoretisch am höchsten. [17; 42; 43]

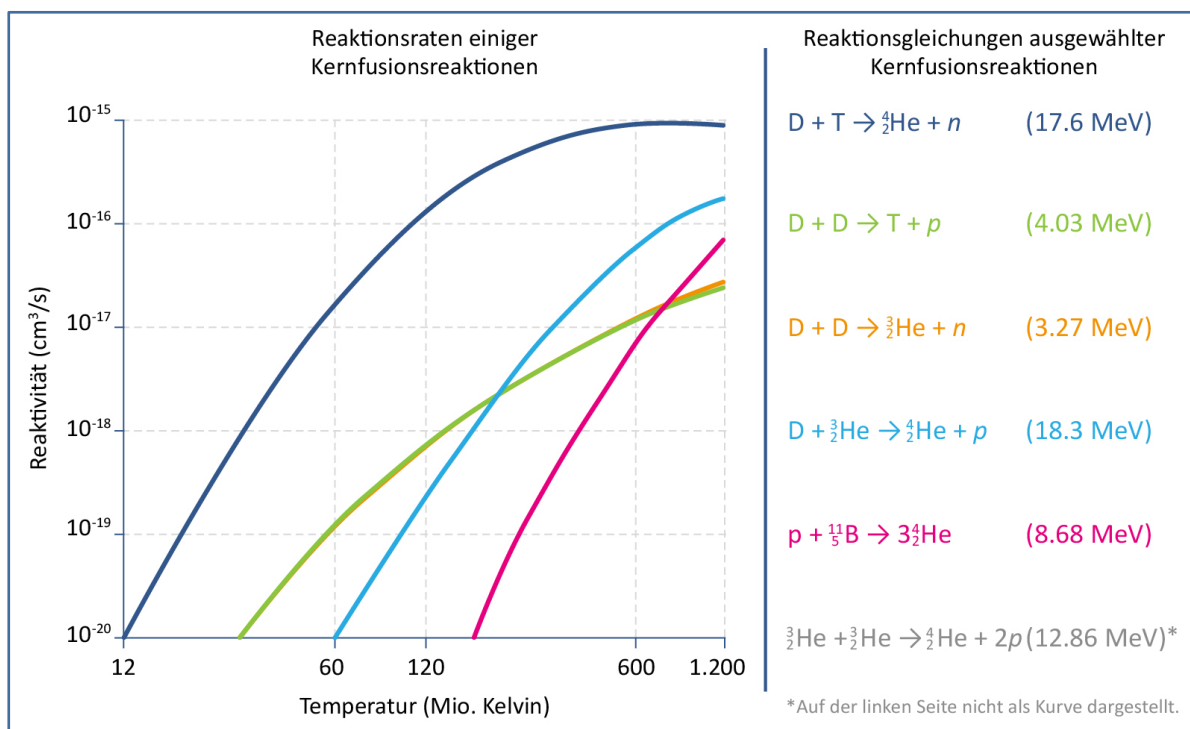


Abbildung 6: Reaktionsraten von Kernfusionsreaktionen mit unterschiedlichen Brennstoffen in Abhängigkeit von der aufzubringenden Temperatur. Quelle links: angepasst an Haefner et al. 2023 [17] sowie Reaktionsgleichungen der Kernfusionsreaktionen, an denen am häufigsten geforscht wird. Quelle rechts: Meschini et al. 2023 [42]

Weitere mögliche Kernfusionsreaktionen sind die Reaktion von zwei **Deuteriumatomen** (D+D), die von zwei **Heliumatomen** (He+He) sowie die Reaktion von **Deuterium und Helium** (D+He). Insbesondere wenn bei der Reaktion der Brennstoffe die 14,1-Megaelektronenvolt-Neutronen (n) freigesetzt werden, die bei der Reaktion von Deuterium und Tritium entstehen, können Materialien im Inneren der Brennkammer beschädigt und aktiviert werden, wodurch diese radioaktiv werden.

¹⁰ Beim einfachen Wasserstoffatom befindet sich im Atomkern nur ein Proton. Deuterium, auch schwerer Wasserstoff genannt, enthält im Kern ein Proton und ein Neutron. Beim Tritium, 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 und der von Tritium liegt noch einmal deutlich darunter (10-15 Prozent). [41]

Bei einigen Kernfusionsreaktionen, wie der Reaktion von Wasserstoff (^1H) mit Bor – auch **Proton-Bor-Reaktion** (p+B) genannt¹¹ – oder der Verschmelzung von Helium-3-Kernen (^3He) – entstehen bei der Ursprungsreaktion zunächst keine Neutronen. Ganz neutronenfrei sind diese allerdings auch nicht, weil mit geringer Wahrscheinlichkeit parallele Prozesse stattfinden können, bei denen Neutronen entstehen. Darüber hinaus hat die Proton-Bor-Reaktion einen deutlichen Nachteil: Sie benötigt im Vergleich zur Deuterium-Tritium-Reaktion wegen der höheren Zahl an Nukleonen im Bor-Kern deutlich mehr Energie für die Zündung des Plasmas, weshalb die Kernfusionsreaktion erst bei 10- bis 30-mal höheren Temperaturen startet (1 bis 3 Milliarden Grad Celsius statt 100 Millionen Grad Celsius [44; 45]). Entsprechend größer werden damit einhergehend die sogenannten Bremsstrahlungsverluste, die zu einer Kühlung des Plasmas führen.

Die höheren Temperaturen steigen bei der Magnetfusion zugleich die Ansprüche an die im Reaktorinneren eingesetzten Materialien. [17; 42; 43] Aufgrund der mindestens 10-fach höheren benötigten Temperatur und der deutlich niedrigeren Reaktionsraten für die Proton-Bor-Reaktion (siehe Abbildung 6), muss das sogenannte Tripelprodukt (siehe Abschnitt 3.2) aus Teilchendichte, Einschlusszeit und Temperatur etwa 1.000-mal größer sein als bei der Deuterium-Tritium-Reaktion. Aktuell blicken Fachleute daher eher skeptisch auf eine mögliche Umsetzung des Proton-Bor-Ansatzes.

¹¹ Bei der Proton-Bor-Reaktion entstehen zwar mit vier Heliumatomen Elemente mit einer niedrigeren Ordnungszahl (4) als das Ausgangselement Bor (Ordnungszahl 11), dennoch handelt es sich um eine Kernfusion, da zunächst für sehr kurze Zeit ein Kohlenstoffatom (Ordnungszahl 12) gebildet wird. Dieses Kohlenstoffatom befindet sich allerdings in einem so stark angeregten Zustand, dass es mit hoher Wahrscheinlichkeit innerhalb kürzester Zeit in vier Heliumatome zerfällt, wobei die Energie in die Bewegungsenergie der Heliumatome übergeht.

3 Stand der Technik

Zur Beantwortung der Fragen, wie viel Energie bei Kernfusionsreaktionen entsteht beziehungsweise bereitgestellt werden kann und wie weit die dafür benötigte Technik entwickelt ist, geben verschiedene Kennzahlen Auskunft: Der Technologiereifegrad (engl. = technology readiness level; TRL) bewertet anhand einer Phaseneinteilung, wie weit die Technologieentwicklung fortgeschritten ist¹², wobei sich die Bewertung prinzipiell auf den Stand der Technik für einzelne Komponenten oder Bauteile, auf den Stand eines technischen Ansatzes (Magnetfusion, Laserfusion) oder den Entwicklungsstand eines Fusionskraftwerks als Ganzes beziehen kann. [46; 47; 48; 49; 50] Das Tripelprodukt und die Energiebilanz geben hingegen Auskunft darüber, ob eine Fusion erreicht wird, ob sie sich ohne Zufuhr von Energie von außen aufrechterhält beziehungsweise wie viel Energie netto durch die Kernfusion bereitgestellt wird (siehe Abbildung 7).



Abbildung 7: Kennzahlen für den Entwicklungsstand der Fusionsforschung mit dem finalen Ziel einer zukünftigen energetischen Nutzung; Quelle: eigene Darstellung

3.1 Technologiereifegrade

Die Nutzbarmachung der Kernfusion zur Energiegewinnung ist komplex und herausfordernd. Geforscht wurde dabei an den verschiedenen Ansätzen mit unterschiedlicher Intensität und Dauer – entsprechend befinden diese sich in verschiedenen Entwicklungsphasen. Bisher ist jedoch kein Ansatz über einen höheren Reifegrad als TRL 5 und damit entscheidend über den Labormaßstab hinausgekommen:

¹² Die Phasen der Technologiereifegrade beschreiben die Entwicklung und Einführung einer Technologie beziehungsweise Erfindung – ausgehend von der Grundlagenforschung (TRL 1) bis hin zum marktfähigen Produkt (TRL 9). [46; 47] Eine Übersicht findet sich zum Beispiel bei [48] Zu beachten ist, dass die TRL-Einordnungen Einschätzungen von Expert*innen sind und voneinander abweichen können. Die Phasenzuordnung gibt allerdings keine Auskunft darüber, wann die nächste Phase erreicht sein wird. Ferner gibt es bisher keine kernfusionspezifischen TRL-Kriterien zur Einordnung der Entwicklungsstände der Technologiekonzepte, Werkstoffe und Kraftwerkskomponenten. [49; 50]

- Im Bereich der **Magnetfusion** wird aktuell dem **Tokamak** ein etwas höherer Stand der Technik zugeordnet: Sein TRL bewegt sich im Bereich 4–5, was dem Versuchsaufbau im Labormaßstab (4) oder in einer relevanten Einsatzumgebung (5) entspricht. Mit ihm wurden bisher im Vergleich zum Stellarator höhere Werte des Tripelprodukts und eine höhere technologische Reife erreicht; dem **Stellarator** wird in der Tendenz ein TRL von 3–4 (Nachweis der Konzeptfunktionsfähigkeit (3) beziehungsweise Versuchsaufbau im Labormaßstab (4)) zugeschrieben. [50, 51, 52] Zu berücksichtigen ist, dass einzelne Lösungsaspekte oder Bauteile dabei bereits weiter oder weniger fortgeschritten sein können als die Gesamtbewertung. Beim Tokamak und Stellarator sind zum Beispiel die Magnetkonfigurationen und die Heizsysteme recht weit entwickelt und die Plasmaperformance wird gut verstanden. Die Gestaltung des Brennstoffkreislaufs weist hingegen sowohl bei der Magnet- als auch bei der Trägheitsfusion ein geringeres TRL-Niveau auf. [50; 52] Der geplante Prototyp des Forschungsreaktors ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor, Tokamak) wird sich bei einer erfolgreichen Umsetzung im Bereich TRL 6 (Prototyp) bewegen und DEMO (DEMONstration Power Plant), der geplante ITER-Nachfolger (Tokamak oder Stellarator), dann bei TRL 7 (Demonstrator).
- Die Verfahren der **Trägheitsfusion** wurden etwas später als die der Magnetfusion entwickelt und unterlagen längere Zeit der militärischen Geheimhaltung, weil entsprechende Experimente auch militärische Anwendungen haben und unter anderem das Verständnis von Prozessen bei Wasserstoffbomben verbesserten. [53; 54; 55; 56] Die unterschiedlichen Ansätze in der Laserfusion sind unterschiedlich weit fortgeschritten: Am weitesten fortgeschritten ist mit TRL 3 (Nachweis der Funktionsfähigkeit des Konzepts) das Indirect-drive-Verfahren, gefolgt von Direct drive mit TRL 2 (Beschreibung des Technologiekonzepts). Den Konzepten Fast ignition und Shock ignition wird hingegen TRL 1 (Beobachtung des Funktionsprinzips) zugeordnet. [17]

3.2 Plasmastabilität und energetische Bilanzierung

Erste Voraussetzung für eine technische Realisierung ist eine **sich selbsttragende Kernfusion**. Das heißt, dass nach äußerer Energiezufuhr das Plasma durch erste Fusionsereignisse weiter geheizt wird und die freiwerdende Energie die auftretenden Verluste kompensiert. Dadurch kommt es zu einem weiteren Anstieg der Fusionsereignisse. Damit sich diese Bedingung einstellt, muss das Produkt aus der Einschlusszeit des Plasmas, der Teilchendichte im Plasma und der Temperatur im Plasma (Tripelprodukt) einen bestimmten Schwellenwert überschreiten: das Lawson-Kriterium (siehe Kapitel 1.1).

Neben dem Lawson-Kriterium, das die physikalische Bedingung für die Zündung darstellt, ist das Verhältnis der freigesetzten Energiemenge aus der Fusionsreaktion im Verhältnis zu der ins Plasma eingebrachten Energiemenge wichtig, aber auch die gesamte Energiebilanz: Bislang erzeugen Fusionsprozesse noch sehr viel weniger Energie, als für den Betrieb einer gesamten Anlage oder eines Kraftwerks gebraucht wird (siehe Abbildungen 8 und 9).

In den zurückliegenden Jahrzehnten ist es der Forschung gelungen, sich einer selbsttragenden Fusion systematisch anzunähern: Bei einem **Laserfusionsexperiment** an der National Ignition Facility (NIF) in den USA wurde 2021 zum ersten Mal in einer kontrollierten Fusionsreaktion im Labor das Lawson-Kriterium überschritten. Das zugrundeliegende Experiment benutzte das Indirect-Drive-Verfahren, um einen zentralen "Hot Spot" aus Deuterium-Tritium-Brennstoff zu erhitzen und zu komprimieren. [57]

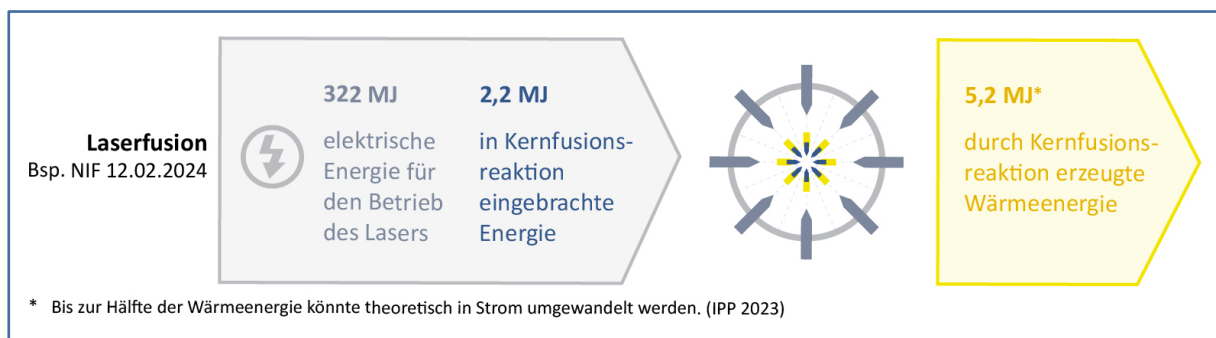


Abbildung 8: Bilanz eines Fusionsexperiments der Laserfusion. Quelle: eigene Darstellung mit Daten von Osolin [58], Simpson [59] sowie Expert*innenangaben von EUROfusion und Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT)

Mit dem Ansatz der Magnetfusion ist das Lawson-Kriterium bisher noch nicht erreicht worden. Um in diesem Technologieansatz die Verluste zu kompensieren, ist ein bestimmtes Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen des eingeschlossenen Plasmas notwendig. Dies wird erst mit den Reaktoren ITER oder SPARC möglich sein. [43; 26; 42]

Aktuell ist die erste Plasmazündung bei ITER für 2034 geplant – zunächst mit Deuterium-Deuterium. Im Jahr 2020 war die erste Plasmazündung noch für das Jahr 2025 vorgesehen gewesen. 2035 soll mit dieser Brennstoffkombination dann der Fusionsbetrieb starten und ab 2039 die Betriebsphase mit Deuterium-Tritium. Allerdings wird auch ITER keine insgesamt positive Energiebilanz erreichen. Dafür ist die Anlage zu klein und wurde auch nicht darauf ausgelegt. Diesen Schritt soll daher der nachfolgende Demonstrator DEMO erreichen.¹³ [26; 60; 61; 62; 63; 64; 65]

¹³ In DEMO (Tokamak oder Stellarator) sollen die Erkenntnisse aus dem Betrieb von ITER und weiteren Forschungsarbeiten am Tokamak- und Stellaratorkonzept einfließen. Der Demonstrator soll alle Komponenten und Funktionen eines einsatzfähigen Kraftwerks enthalten. Das beinhaltet auch die Bereitstellung eines geschlossenen Brennstoffkreislaufs, das heißt DEMO wird das benötigte Tritium selbst vor Ort erzeugen. Geplant ist, dass das First-of-a-kind-Kraftwerk um 2050 herum Strom ins Netz einspeisen wird. [26; 62; 63; 64; 65]

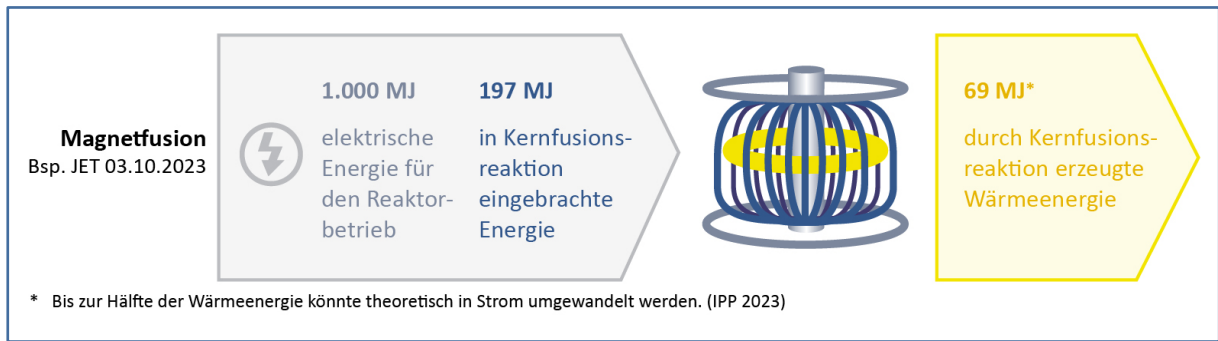


Abbildung 9: Bilanz eines Fusionsexperiments der Magnetfusion. Quelle: eigene Darstellung mit Daten von IPP [66] sowie Expert*innenangaben von EUROfusion.

Somit lässt sich festhalten: Für einen funktionierenden Kraftwerksbetrieb muss das Verhältnis aus freigesetzter Wärmemenge und zuvor in den Reaktor eingespeister Energie noch deutlich gesteigert werden. Entscheidend für den Betrieb und daran anschließend die Wirtschaftlichkeit eines Fusionskraftwerks ist also die gesamte **Energiebilanz**, die den Gesamtenergiebedarf der jeweiligen Anlage in Bezug setzt zur Energie, die das Kraftwerk über die Fusionsreaktion freisetzt. [17; 67]

4 Kernfusionsprojekte weltweit

Die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEA) listet weltweit 144 Fusionsprojekte auf (Abbildung 10), die von unterschiedlichen Akteuren betrieben werden – vorrangig von Forschungseinrichtungen (rund 75 Prozent), aber auch von Start-ups. Sie befinden sich in unterschiedlichen Entwicklungsphasen (in/außer Betrieb, im Bau, in Planung).¹⁴ [68; 69] Die meisten Anlagen stehen in den USA (35), in Japan (25), Russland (13), China (11) und Großbritannien (9). In der EU sind es zusammen 21 Projekte, von denen laut IAEA 4 in Deutschland liegen. [69]



Abbildung 10: Regionale Verteilung verschiedener Typen von Fusionsanlagen gemäß IAEA. Quelle: angepasst an FusDIS 2021 [69]

4.1 Forschungseinrichtungen

Mit Blick auf die **Magnetfusion** sind derzeit weltweit 56 **Tokamaks** als Forschungsanlagen in Betrieb, von denen sich 10 in Europa befinden. [69] Von den bestehenden Tokamaks ist aktuell der japanische JT-60SA, ein Kooperationsprojekt mit der EU, der weltweit größte. Er löste 2023 den europäischen JET ab, der von 1983 bis 2024 in Betrieb war und in dem es 1991 erstmals gelang, im Rahmen einer kontrollierten Kernfusion eine relevante Menge an Energie freizusetzen. Für die Dauer von 2 Sekunden stellte JET dabei eine Fusionsleistung von rund 1,7 Megawatt bereit. [70; 71; 72] Der JT-60SA selbst ergänzt als „Satellitenprojekt“ die Forschung beim ITER und zu DEMO. Untersucht werden dort unter anderem Sicherheitsaspekte beim Zusammenspiel von Bauteilen, Möglichkeiten zur Verlängerung der Pulsdauer und Plasmaszenarien. Letztere sind Betriebsarten für ein Kraftwerk, die eine möglichst hohe Wärmeisolierung des Plasmas bei einer gleichzeitig gegebenen Plasmastabilität ermöglichen. Sie sollen bei ITER zum Einsatz kommen. [73; 74] Mit dem chinesischen Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST) konnte wiederum am 30.12.2021 ein zeitlicher Rekord aufgestellt werden, als mit 1.056 Sekunden die bisher längste Aufrechterhaltung eines stabilen Plasmas in einem gepulsten Betrieb gelang. [75] EAST wurde in den 1990ern in Zusammenarbeit mit der Russischen Föderation erbaut, die dortige Erforschung der Plasmaphysik trägt durch einen mit ITER vergleichbaren Aufbau ebenfalls zu dessen Entwicklung bei. [76]

¹⁴ Zu berücksichtigen ist, dass die IAEA nicht zwischen in Betrieb befindlichen und stillgelegten Forschungsanlagen unterscheidet. Die Daten sind zudem teils nicht deckungsgleich mit anderen Quellen. So weist die Fusion Industry Association zum Beispiel 43 Start-ups aus, die IAEA 33. [68; 69 – Stand 25.03.2024]

Wie erwähnt ist die Forschung am **Stellarator** im Vergleich zum Tokamak nicht ganz so weit fortgeschritten. Mit dem seit 2015 in Greifswald betriebenen Wendelstein 7-X, dem aktuell weltweit größten und leistungsstärksten Stellarator, wird daher zunächst die grundsätzliche Kraftwerkstauglichkeit des Stellaratorkonzepts untersucht. Dies umfasst unter anderem die Plasmaerzeugung sowie den Teilchen- und Energieeinschluss im Plasma. [77; 78] Zu Letzterem konnte am 15. Februar 2023 in einem Stellarator ein neuer Rekord aufgestellt werden, indem Wendelstein 7-X für den Plasmaeinschluss eine Plasmaentladungszeit von rund 8 Minuten erreichte. [79] Weltweit sind gegenwärtig 12 Anlagen in Betrieb, die dem Stellaratorkonzept zugeordnet werden. [69] Neben Wendelstein 7-X gibt es in Europa weitere, kleinere Forschungsstellaratoren in Deutschland, der Ukraine und Spanien. Außerhalb Europas wird mit dem Large Helical Device (LHD) ein großer Stellarator in Japan betrieben und kleinere in den USA und Costa Rica. Ganz allgemein weisen die unterschiedlichen Testanlagen beispielsweise unterschiedliche Magnetfeldkonfigurationen auf und erlauben somit sowohl einen Vergleich untereinander (Plasmaeigenschaften, Plasmaeinschluss etc.) als auch einen Vergleich mit dem Tokamakkonzept. [76; 80] Sie zielen bisher jedoch nicht darauf ab, eine sich selbst tragende Kernfusionsreaktion umzusetzen, das heißt eine solche ist mit einem Stellarator noch nicht realisiert worden.

In Deutschland findet die Fusionsforschung im Bereich der Magnetfusion insbesondere am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) statt. Mit dem ASDEX-Upgrade (Tokamak) in Garching und Wendelstein 7-X in Greifswald sind zwei der wichtigsten Forschungsanlagen für die Magnetfusion in Deutschland angesiedelt. Der 1991 in Betrieb genommene ASDEX-Upgrade dient dabei der Grundlagenforschung und liefert wichtige Erkenntnisse für den Plasmabetrieb am internationalen Testreaktor ITER beziehungsweise allgemein für potenzielle Tokamakkraftwerke. Geforscht wird mit ASDEX-Upgrade insbesondere an Plasmaszenarien und der Ableitung von Teilchen und Wärme über den Divertor.¹⁵ Mit dem für das Reaktorinnere aussichtsreichen Wandmaterial Wolfram hat er zudem international ein Alleinstellungsmerkmal. [81; 82] Weitere relevante Forschungseinrichtungen im Bereich der Magnetfusion in Deutschland sind das Forschungszentrum Jülich und das Karlsruher Institut für Technologie (KIT).¹⁶ [83]

Im Bereich der **Trägheitsfusion** sind laut IAEA derzeit weniger als 10 Forschungsanlagen in Betrieb, die sich in den USA, Japan, China, Großbritannien und Frankreich befinden. [76; 17] Die weltweit einzige Einrichtung, deren Laser gegenwärtig stark genug sind, um eine Plasmazündung und dessen Ausbreitung im Target zu realisieren, ist das NIF am Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL). [17] Weitere Forschungseinrichtungen mit sehr leistungsstarken Lasern befinden sich in Frankreich, den USA und in China. Wenn der gegenwärtige Ausbau der Laserfusionsanlage UFL-2M in Russland beendet ist, ist nach heutigem Kenntnisstand zu erwarten, dass diese zu den weltweit leistungsstärksten Laseranlagen aufsteigt und dann vergleichbar mit der Anlage beim NIF sein wird. [17; 84] Zu berücksichtigen ist in diesem Zusammenhang, dass die Forschungsarbeiten am NIF, dem französischen Laser Mégajoule (LMJ) und am russischen UFL-2M nicht primär auf eine energiewirtschaftliche Nutzung zielen, sondern zunächst militärische Zielsetzungen verfolgen. [85; 86; 17; 87; 88] Die für die Trägheitsfusion relevante Forschungslandschaft umfasst darüber hinaus weitere Forschungseinrichtungen, die beispielsweise im LaserNetUS in den USA [89] sowie im Laserlab Europe [90] und der Extreme Light Infrastructure [91] in Europa organisiert sind. Ein anderer Ansatz der Trägheitsfusion ist der sogenannte Z-Pinch, bei dem im Plasma ein elektrischer Strom induziert wird, um ein Magnetfeld zu erzeugen, das das Plasma komprimiert. Dazu wird zum Beispiel an den Sandia National Laboratories in den USA geforscht. [92]

15 Der Divertor leitet Verunreinigungen, die sich unter anderem aus der Wand lösen, sowie die Abbauprodukte der Kernfusionsreaktion (zum Beispiel Helium) aus dem Inneren des Vakuumgefäßes ab und kommt damit regelmäßig direkt in Kontakt mit dem Plasma.

16 Das FZ Jülich beschäftigt sich verstärkt mit Wechselwirkungen zwischen dem Plasma und der ersten Wand und sowie mit der Eignung von Materialien für das Reaktorinnere. Am KIT wird unter anderem zu neutronenresistenten Materialien, zur Toxizität von Materialien, zur Gewinnung von Tritium in Brutblankets beziehungsweise zur Schließung des Brennstoffkreislaufs mit Tritium sowie zu Divertorkonzepten geforscht. [83]

In Deutschland wird gegenwärtig vergleichsweise wenig zur Trägheitsfusion geforscht und es existieren keine Implosionsforschungsanlagen, die mit den Lasern an der National Ignition Facility (NIF) in den USA oder dem LMJ in Frankreich vergleichbar wären. Allerdings gibt es mehrere Forschungsinstitutionen und Unternehmen, die unter anderem zur Schockphysik, Teilchenbeschleunigung und Optik, zum Fertigungs- und Anlagenbau oder zur Oberflächenbeschaffenheit und Widerstandsfähigkeit von Materialien unter Extrembedingungen arbeiten oder sie sind durch ihre international bedeutenden hochenergetischen Lasersysteme, präzisen Messgeräte beziehungsweise ihre Expertise in der Herstellung von Targets mit der Laserfusionsforschung verbunden. Außerdem arbeiten in Deutschland Forschungseinrichtungen an Laserplasmen und der Laserplasmadiagnostik.¹⁷

4.2 Start-ups

1992 wurde mit „Princeton Fusion Systems“ in den USA das erste Start-up im Kernfusionsbereich gegründet, TAE Technologies (1998) und General Fusion (2002) folgten. Bis 2017 stieg ihre Zahl langsam, aber stetig auf 12. Ab dem Jahr 2018 sind dann deutliche Zuwächse zu verzeichnen. Aktuell existieren 43 Start-ups, von denen die meisten in den USA ansässig (25) sind, gefolgt von Europa (9), Asien (5) sowie Australien, Israel, Kanada und Neuseeland (jeweils 1). [68; 68]


Von den Forschungsanlagen unterscheidet sich der Start-up-Bereich im Vergleich zu Forschungseinrichtungen einerseits durch zum Teil sehr ambitionierte Zeitpläne, die eine Realisierung eines ersten Kraftwerks noch vor 2040 vorsehen, was von Fachleuten in der Regel kritisch betrachtet wird (vergleiche Abschnitt 7). Auf der anderen Seite verfolgen die Unternehmen eine größere Bandbreite an technologischen Ansätzen, mit denen sie die Kommerzialisierung der Kernfusion erreichen wollen. [69; 76; 68; 109; 69; 76] So greifen Start-ups zum Beispiel Konzepte auf, die in Forschungsinstituten nicht mehr gezielt verfolgt wurden, etwa das Magneteinschlussverfahren Field-Reversed-Configuration-Design. Früh von der Wissenschaft entwickelt, musste es den erfolgsversprechenderen Konzepten Tokamak und Stellarator weichen. Princeton Fusion Systems und TAE Technologies haben diesen Ansatz wieder aufgegriffen. [93; 109; 68; 76] Ebenso forschen Start-ups an Ansätzen, die noch nicht sehr weit entwickelt sind. So verfolgt neben Focused Energy zum Beispiel auch EX-Fusion (Japan) den Fast-ignition-Ansatz der Trägheitsfusion. (38; 94; 68; 109]

¹⁷ Neben Forschungseinrichtungen wie dem Helmholtz-Zentrum für Schwerionenforschung (GSI), dem Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT), dem Laser Zentrum Hannover (LZH) oder dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) und dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf zählen dazu auch Universitäten wie die Ludwig-Maximilian-Universität München (Center for Advanced Laser Applications (CALA)), die TU Darmstadt (Institut für Kernphysik), die TU München (Physik Department) oder die Universität Stuttgart (Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)) sowie Unternehmen wie TRUMPF, IPG, Jenoptic oder Zeiss dazu. [21; 17]

INFO: Start-ups in Deutschland


Magnetfusion

Gauss Fusion

Gründung	2022	
Standort	Garching	
Ansatz	Stellarator Brennstoffe: Deuterium und Tritium	
Ziel	kommerzielles Kraftwerk im Gigawattmaßstab bis 2045	

Quellen: Gauss Fusion o. A.; Presseportal 2024; FIA 2023


Proxima Fusion

Gründung	2023	
Standort	München	
Ansatz	Stellarator – IPP-Ausgründung mit Wendelstein-7-X-Erfahrung Brennstoffe: Deuterium und Tritium	
Ziel	Pilotanlage für Beginn 2030er und kommerzielles Kraftwerk bis Ende 2030er	

Quellen: Proxima Fusion o. A.; FIA 2023


Laserfusion

Marvel Fusion

Gründung	2019	
Standort	München	
Ansatz	Trägheitsfusion per Kurzimpulslaser (short pulse laser driven inertial confinement) Brennstoffe: ohne Festlegung	
Ziel	Pilotanlage bis 2032; kommerzielles Kraftwerk ab Mitte 2030er	

Quellen: Marvel Fusion o. A.; Astheimer/Finsterbuch 2023; FIA 2023

Focused Energy

Gründung	2021	
Standorte	Austin, Texas (USA) / Darmstadt	
Ansatz	Trägheitsfusion (fast ignition direct drive) per Laser Brennstoffe: Deuterium und Tritium	
Ziel	Pilotanlage für zweite Hälfte der 2030er	

Quellen: Focused Energy o. A.; Ditmire et al. 2023; FIA 2023

Wie Forschungseinrichtungen setzen auch Start-ups wegen der einfacher zu erreichenden Kernfusionsbedingungen vorrangig auf Deuterium und Tritium als **Brennstoffe**. [68] Unter anderem, um radioaktive Reststoffe zu umgehen (siehe Abschnitt 2.3 und 6.4), werden beziehungsweise wurden jedoch auch andere, von den Fusionsbedingungen her anspruchsvollere Ansätze wie beispielsweise die Reaktion von (Wasserstoff-)Protonen mit Bor verfolgt (zum Beispiel Marvel Fusion, TAE Technologies). [44; 45]

Die **Finanzierung** der Start-ups erfolgt laut der Fusion Industry Association fast vollständig über private Investoren (rund 98 Prozent). Auf rund 6,2 Milliarden US-Dollar summierten sich ihre Investitionen bis zum Jahr 2022. Gegenüber 2021 sind sie damit noch einmal um 1,4 Milliarden US-Dollar angestiegen.¹⁸ [73; 95] Auffällig ist dabei allerdings die ungleiche Verteilung der Gelder: Acht der Start-ups konnten jeweils mehr als 200 Millionen US-Dollar akquirieren, wobei Commonwealth Fusion Systems (über 2 Milliarden US-Dollar) und TAE Technologies (über 1 Milliarde US-Dollar) zusammen bereits für etwas mehr als die Hälfte der Gesamtinvestitionen von 6,2 Milliarden US-Dollar stehen. [68]

¹⁸ Zum Vergleich: Die Kosten für ITER, das bisher größte und teuerste Fusionsprojekt belaufen sich nach derzeitigen Schätzungen auf rund 18-22 Milliarden Euro [28] Mit seiner speziellen Kostenstruktur und der Vielzahl an beteiligten globalen Kooperationspartnern inklusive deren zu berücksichtigenden Interessen [28; 95], ist der Testreaktor allerdings nur begrenzt mit der Errichtung eines Fusionskraftwerks vergleichbar.

5 Chancen und Benefits der Fusionsforschung

Die Aussicht auf eine versorgungssichere, wetterunabhängige und CO₂-freie Energieerzeugung ist der wichtigste Treiber hinter der Entwicklung der Kernfusion. Sie könnte die erneuerbaren Energien in der Stromerzeugung ergänzen, einen Beitrag zur Senkung der globalen Abhängigkeit von fossilen Energien leisten und die Energiesouveränität Europas stärken. Da es sich bei Fusionskraftwerken verstärkt um zentrale Anlagen im Gigawattbereich handeln würde (voraussichtlich 1-2 Gigawatt elektrische Leistung; vergleichbar mit heutigen Kernkraft- oder Braunkohlekraftwerken¹⁹), [96] könnten sie wie heute fossile Großkraftwerke oder Kernspaltungskraftwerke eingesetzt werden. Fusionskraftwerke könnten helfen, den allgemein steigenden Strombedarf für die Elektrifizierung und Digitalisierung, aber auch für zukünftige Anwendungen wie die Wasserstoffgewinnung per Elektrolyse, die Entsalzung von Meerwasser oder eine mögliche Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre per Direct Air Capture (DAC) zu decken, insofern sie dann wirtschaftlich wettbewerbsfähig sind (zur Einordnung siehe Kapitel 8). [21; 17; 97; 98; 20]

Einige Vorteile der Kernfusion werden in der Debatte um ihre mögliche Realisierung und Integration ins Energiesystem immer wieder erwähnt. Dazu zählen der im Vergleich zu anderen Arten der Energiegewinnung eher geringe Flächenbedarf potenzieller Fusionskraftwerke und die im Vergleich zu fossilen Energieträgern geringen Umweltbelastung der Energieerzeugung – insbesondere die geringe CO₂-Belastung. Darüber hinaus werden die wirtschaftlichen Chancen wie die Erschließung neuer Märkte und die Stärkung der Wirtschaftsstandorte im Fall einer erfolgreichen Umsetzung in Deutschland beziehungsweise Europa betont.

5.1 Begrenzte Umweltbelastungen

Hinsichtlich der **Umweltbelastung** werden allgemein hauptsächlich folgende Gründe angeführt, die im Vergleich zu anderen Arten der Energiegewinnung für die Kernfusion sprechen können. Im Vergleich zu Kernspaltungskraftwerken sind das geringere Risiko, die sich durch die Radioaktivität der Brennstoffe und der Reaktionsprodukte ergeben, im Vergleich zu den fossilen Energieträgern die emissionsarme Stromerzeugung und ganz allgemein die unter Berücksichtigung der Erzeugungsleistung eher begrenzte Flächeninanspruchnahme für die Kraftwerke.

Im Gegensatz zu Kernspaltungskraftwerken mit ihren abgebrannten Brennstoffen fallen bei Fusionskraftwerken hochradioaktive Abfälle nur in Abhängigkeit von den im Reaktorinneren eingesetzten Materialien an. Bei den meisten Fusionsreaktionen entstehen jedoch nur **schwach- bis mittelradioaktive Abfälle**, die nicht über einen sehr langen Zeitraum eingelagert, das heißt endgelagert werden müssten, sondern um die 100 Jahre sicher aufzubewahren sind. Neben dem Abfallaspekt besteht bei der Kernfusion im Gegensatz zur Kernspaltung grundsätzlich nicht das Risiko einer Kettenreaktion. Schwere Nuklearunfälle sind daher ausgeschlossen und bei möglichen Strahlungsunfällen blieben die Folgen auf das Kraftwerksgelände beziehungsweise die direkte Umgebung beschränkt. Weiterer positive Aspekte sind die insbesondere im Vergleich zu fossilen Kraftwerken **geringen Mengen an benötigtem Brennstoff** beziehungsweise im Vergleich zu Kernspaltungskraftwerken potenziell besseren Verfügbarkeiten sowie damit verbundenen geringeren Abhängigkeiten bei der Brennstoffbeschaffung. [99; 17; 20; 100]

Die **CO₂-Belastungen** eines Kraftwerksbetriebs liegen bei der Kernfusion deutlich unter denen der fossilen Energien. Bezogen auf den gesamten Lebenszyklus eines Kraftwerks ergeben sie sich vorrangig auf die

¹⁹ Insbesondere Fusionskraftwerke, die nach dem Prinzip der Magnetfusion arbeiten, werden sich voraussichtlich in diesem Bereich bewegen. Vereinzelt streben Entwickler*innen aber auch kleinere Reaktoren an. So plant das Start-up General Fusion, das technisch auf eine Mischung aus Magnet- und Trägheitsfusion setzt, bei seinem ersten Kraftwerk zum Beispiel mit einer elektrischen Leistung von rund 300 Megawatt, die sich aus zwei 150 MWel-Anlagen zusammensetzt. [96]

Phasen des Auf- und Abbaus der Anlage sowie die Einlagerung beziehungsweise Sicherung der radioaktiven Abfällen. In einer zunehmend CO₂-armen Wirtschaft werden allerdings auch diese Belastungen systematisch abnehmen. Gegenwärtig wäre der Ausstoß von Fusionskraftwerken gemäß Lebenszyklusanalysen in etwa vergleichbar mit dem von Windkraftanlagen, der Photovoltaik und von Kernspaltungskraftwerken. [98; 101; 102; 103] Das zentrale Abluftprodukt aus Kernfusionsreaktionen ist Helium, das nicht als Treibhausgas eingestuft wird. Für Menschen und die Umwelt ist Helium ungiftig. [20; 104; 105]

Der **Flächenverbrauch** für ein Fusionskraftwerk ist grundsätzlich mit dem eines Kernspaltungskraftwerks vergleichbar. [106] Letztere nehmen laut Lebenszyklusanalysen mit am wenigsten Fläche pro Leistung in Anspruch. Ihr Bedarf entspräche aus heutiger Sicht in etwa dem von Wind onshore und auf Dächern installierten Photovoltaikmodulen. [102]

5.2 Wirtschaftliche Chancen und Hochtechnologieentwicklung

Die Entwicklung eines Fusionskraftwerks kann nicht nur als Ergänzung für das zukünftige deutsche und europäische Energiesystem interessant sein. Wenn die Einbindung von Fusionskraftwerken in das sektorübergreifende Energiesystem wirtschaftlich wettbewerbsfähig ist, dann ergeben sich für die Länder, die über das Know-how dieser Technologie verfügen, weitere Vorteile. Vor dem Hintergrund des erwarteten weltweit deutlich steigenden Strombedarfs können die entwickelten technischen Anlagen beziehungsweise das Wissen um deren Errichtung oder auch die Ausfuhr relevanter Bauteile **neue Exportmärkte erschließen**. Die Einführung einer neuen Technologie könnte somit dazu beitragen, einerseits die Standortattraktivität und die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands und Europas zu erhöhen und andererseits Abhängigkeiten im Bereich von Energieimporten zu verringern [17; 21; 67; 107; 108]

Die Entwicklung der Kernfusion bewegt sich tendenziell noch im Bereich der Grundlagenforschung, überschreitet bei einzelnen Lösungen aber bereits die Schwelle zur angewandten Forschung. [17; 21; 42] Sich aus der Entwicklung von Hochtechnologiekomponenten ergebende Spill-over-Effekte und Ausgründungen, sogenannte Spin-offs, können für Investor*innen eine Streuung der Investitionsrisiken mit sich bringen und zur Stärkung des Technologiestandorts Deutschland beziehungsweise der ansässigen Zulieferindustrien beitragen. Start-ups der Kernfusion legen ihren Schwerpunkt klar auf die Stromproduktion, sehen zugleich aber auch einnahmenrelevante Potenziale in technischen Lösungen, Materialien oder Analysemethoden, die in darüber hinausgehenden Anwendungsfeldern wie der Medizin, Optik, Diagnostik, Robotik, Raumfahrt et cetera zum Einsatz kommen können.²⁰ [17; 21; 42; 68; 83; 109; 110]

²⁰ So besitzt TAE Technologies, das zweitälteste Start-up der Kernfusion, zum Beispiel weltweit etwa 1.400 eingetragene Patente [109], und der Mutterkonzern des 1992 gegründeten Princeton Fusion Systems, Princeton Satellite Systems, ist im Bereich der Raumfahrtsteuerung aktiv [110]

6 Herausforderungen auf dem Weg zum Kernfusionskraftwerk

Keines der Fusionskonzepte befindet sich gegenwärtig in einem Entwicklungsstand, der einen Kraftwerkstestbetrieb ermöglichen würde. Bis zu einer Realisierung beziehungsweise Kommerzialisierung im Kraftwerksmaßstab sind vielmehr noch zahlreiche Herausforderungen zu bewältigen. Das beinhaltet unter anderem technische Fragestellungen zur Gestaltung der Brennkammer, der Leistungsfähigkeit der Laser beziehungsweise Magnete, die Entwicklung widerstandsfähiger Materialien, das Schließen des Brennstoffkreislaufs und eine industrielle Fertigung der Brennstoff-Targets. Intensiv geforscht wird ebenfalls an Automatisierungsprozessen zum Beispiel zur Zuführung der Brennstoffe in die Brennstoffkammer, zur Fernwartung oder für den Austausch von überbeanspruchten Bauteilen. Für alle Konzepte sind darüber hinaus Regulierungs- und Finanzierungsfragen zu klären. Die skizzierten Herausforderungen unterscheiden sich dabei nicht grundsätzlich für Forschungseinrichtungen oder Start-ups (siehe dazu auch Abbildung 11), die in diesem Gebiet arbeiten. [67; 111; 17; 21; 68]

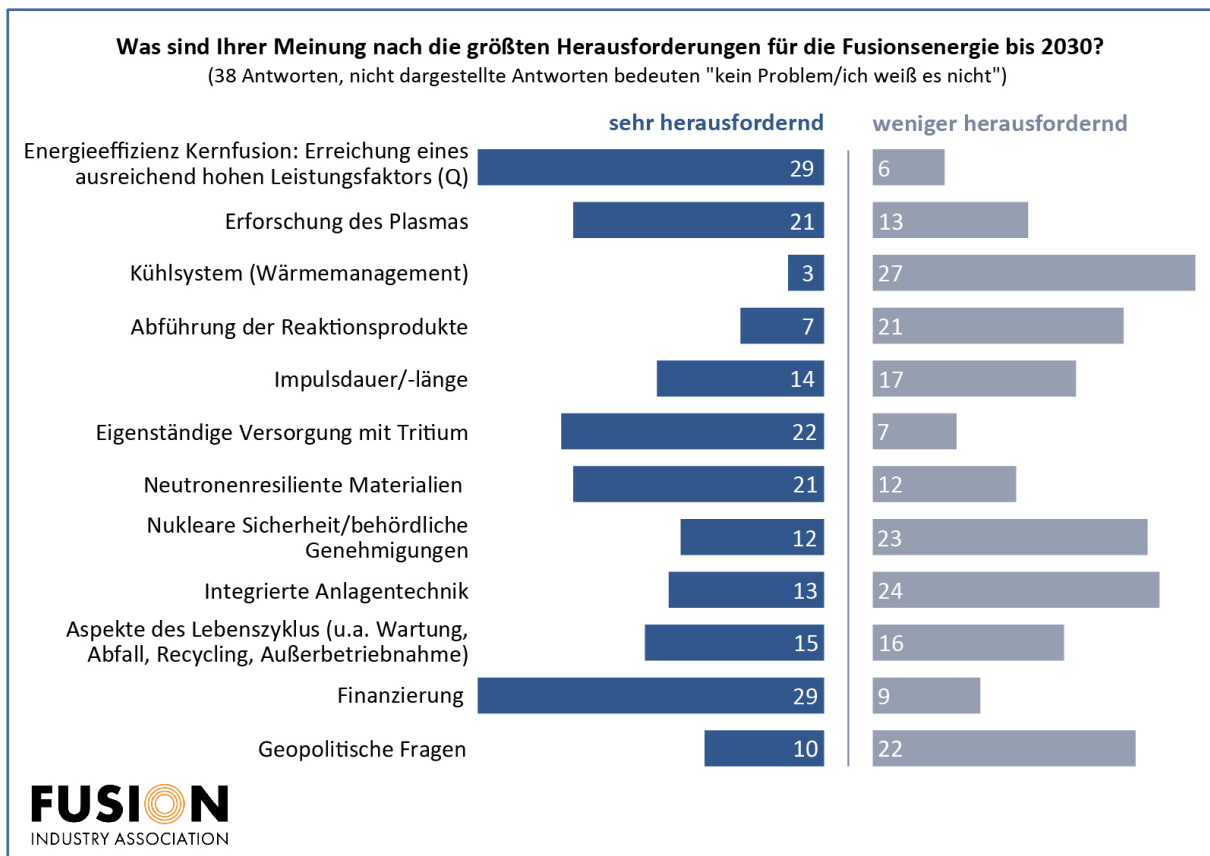


Abbildung 11: Zentrale Herausforderungen für die Kernfusion bis zum Jahr 2030 aus der Sicht von Start-ups. Quelle: angepasst an Fusion Industry Association 2023, S. 12 [68]

6.1 Plasmaerhalt und Energiebilanz

Eine stete Energieerzeugung setzt voraus, dass die **Kernfusionsbedingungen** zuverlässig über eine lange Dauer oder mit einer hohen Wiederholungsrate realisiert werden. Für einen wirtschaftlichen Kraftwerkstestbetrieb heißt dies, das Plasma müsste bei der Magnetfusion über einen Zeitraum von Stunden bis gegebenenfalls Tagen stabil gehalten werden. Dies stellt eine erhebliche Steigerung gegenüber den bisherigen

Rekorden dar, die aktuell im Minutenbereich liegen²¹, wobei mit zu berücksichtigen ist, dass derzeit teils auch die technischen Randbedingungen, wie beispielsweise eine ausreichende Energiebereitstellung, limitierend für Großexperimente wirken. Bei der Trägheitsfusion ist neben der zu steigernden Leistung des in das Target eingebrachten Energieimpulses die Erhöhung der Beschussrate der entscheidende Faktor. Möglich sind heute erst wenige Zündungen pro Tag und auf der höchsten Energiestufe aufgrund der langen Abkühlzeiten des Lasers nur ein Schuss alle zwei Tage. Für einen Kraftwerksbetrieb müsste die Frequenz jedoch bei 10 bis 20 Plasmazündungen pro Sekunde liegen.²² [112]

Ohne eine deutliche Steigerung der Einschusszeit des Plasmas bei der Magnetfusion beziehungsweise der Schussfrequenz und -intensität bei der Trägheitsfusion lassen sich keine steten Fusionsbedingungen realisieren, die die Grundvoraussetzung für eine positive **Energiebilanz** darstellen. Für ein kommerzielles Fusionskraftwerk muss die Energiebilanz noch um ein Vielfaches gesteigert werden.²³ Das bezieht sich auf die Gesamtenergieausbeute netto, bei der alle Energiebedarfe und -verluste des Kraftwerks der vom Kraftwerk erzeugten Energie gegenübergestellt werden. Dementsprechend müssen zur Optimierung der Energiebilanz die genannten kraftwerksnotwendigen Fusionsbedingungen nicht nur erreicht, sondern gleichzeitig materialbezogene und technische Lösungen entwickelt werden (siehe Abschnitt 6.2 und 6.3), mit denen die benötigten Bauteile und Kraftwerkselemente energieeffizient arbeiten können. Besonders große Mengen an Energie beanspruchen bei der Magnetfusion beispielsweise die Plasmaheizung und die Kühlung der supraleitenden Magnetspulen (Kryostat). [26; 113; 201] Bei der Laserfusion ist es vor allem die Energieeffizienz des Lasers. [17]

6.2 Technische Komponenten

Es sind nicht allein die extremen Umgebungsbedingungen im Reaktorinneren beziehungsweise die teils hohen Temperaturdifferenzen, denen Bauteile ausgesetzt sind. Besondere Herausforderungen für die Ausgestaltung der technischen Komponenten eines Fusionskraftwerks beziehungsweise deren Entwicklung stellt auch der Umstand dar, dass einige Bauteile oder Materialien bisher nicht in einer potenziell realen Einsatzumgebung getestet werden konnten und damit einhergehend Erfahrungswissen fehlt.

Eine besondere Herausforderung ist die technische **Ausgestaltung der ersten Wand**, das heißt der inneren Schale des Vakuumgefäßes, **sowie des Blankets**, das gleich mehrere Funktionen bedienen muss: Zu klären ist unter anderem, wie die Wärme, die sich aus der aufgenommenen Bewegungsenergie der bei der Fusion freigesetzten Neutronen beziehungsweise Atome ergibt, möglichst effizient über ein Kühlmittel aus dem Blanket in den äußeren Kraftwerksbereich abgegeben werden kann. Wasser, Helium oder Mischungen aus Helium, Lithium beziehungsweise Blei werden diesbezüglich als Kühlmittel diskutiert. Die Wände des Blankets müssen sehr belastungsresistent sein, weil es die äußeren Anlagenteile vor der Neutronenstrahlung schützt. Geforscht wird darüber hinaus daran, wie im Blanket-Inneren mithilfe von Neutronen der Brennstoff Tritium erzeugt und nach außen zur Aufreinigung abgeführt werden kann. Relevant ist dies für die Ansätze, bei denen Tritium als Brennstoff zu Einsatz kommt. [17; 20; 99]

Insbesondere für die Trägheitsfusion ist eine weitere offene Frage, mit welcher Vakuumtechnik aus dem Blanket die Reaktionsprodukte schnell und effizient entfernt werden können, denn für jede Plasmazündung braucht es eine ausreichend saubere Zündumgebung. Bei der Trägheitsfusion ist nach jedem Schuss, also mit Raten von 10- bis 20-mal pro Sekunde bei einem kommerziellen Kraftwerk, das Reaktorinnere von der

²¹ Beim Tokamak sind es aktuell rund 17 Minuten, beim Stellarator circa 8 Minuten (siehe Abschnitt 4.1).

²² Dabei kommen vor allem Laser mit einer Pulslänge im Nanosekundenbereich oder weniger zum Einsatz. [40; 17]

²³ Sowohl für ein Trägheitsfusions- als auch ein Magnetfusionskraftwerk, das perspektivisch wirtschaftlich tragfähig Strom ins Netz einspeisen soll, müsste das Verhältnis aus in die Brennstoffe eingebrachter Energie und der aus der Kernfusionsreaktion resultierenden Wärmeenergie etwa im Bereich von 50 und darüber liegen.

entstehenden Asche und eventuell übrig gebliebenen Brennstoffresten zu säubern, um die Ausbreitung der Laserstrahlen nicht negativ zu beeinflussen. (17, 68)]

Magnetfusionsanlagen benötigen leistungsstarke Magnetfelder mit gleichzeitig großen Volumina (siehe zum Beispiel [114]. Trotz der bereits erreichten Leistungssteigerungen bei den **Magneten** besteht weiterhin Optimierungsbedarf: So wird beispielsweise daran geforscht, thermomagnetische Instabilitäten präziser zu erkennen und stärker zu dämpfen, weil sie zu einer Verformung der Supraleiter (Quench) führen können. Weitere Punkte sind eine verbesserte Abführung der Wärme der Supraleiter sowie eine stärkere Differenzierung beim Einsatz der verwendeten Niedrig- und Hochtemperatursupraleiter, um den Kühlaufwand der gesamten Anlagen zu reduzieren. [115; 42] Ganz allgemein müssen die supraleitenden Spulen von den hohen Temperaturen im Reaktorinneren (über 100 Millionen Grad Celsius) und der im/am Reaktor entstehenden Abwärme ausreichend abgeschirmt sein. Ihre herausragende Leitfähigkeit erreichen sie nämlich nur, wenn sie auf sehr tiefe Temperaturen heruntergekühlt werden (circa -263 Grad Celsius bei der Nutzung klassischer Supraleiter). Weitere Forschungsaktivitäten beziehen sich auf die Verringerung des notwendigen Gesamtvolumens beziehungsweise des Gewichts der Magnete sowie die Senkung der Kosten für deren Herstellung. [115; 116; 64; 117; 64] Das Massachusetts Institute of Technology (MIT) hat diesbezüglich zusammen mit dem Start-up Commonwealth Fusion Systems einen leistungsstarken Supraleiter für einen Tokamak entwickelt (20 Tesla), getestet und vorgestellt, der geringere Niedrigtemperatursprüche stellt und eine verbesserte Effizienz aufweist. Dabei wurde insbesondere auf eine Isolierung der Bänder, die den Supraleiter bilden, verzichtet. Das ermöglichte eine Senkung des Platzbedarfs und des Gewichts und zugleich vereinfachte sich der Aufbau des Supraleiters. [64; 118]

Für die Laserfusion ist wiederum die Weiterentwicklung der **Laser** zentral. Verwendet werden Laser mit einer Pulslänge im Nanosekundenbereich. Mit jedem Impuls muss dabei ausreichend Energie in das Target eingebracht werden, um pro Schuss eine positive Gesamtenergiebilanz zu erreichen. Moderne gepulste Lasersysteme, die Dioden einsetzen, weisen beispielsweise im Vergleich zum NIF-System bereits eine deutlich höhere Effizienz auf (etwa Faktor 10). Neben der Steigerung der bereits erwähnten Beschussfrequenz zielen weitere Forschungsanstrengungen unter anderem auf die Erhöhung der Pulsenergie, die Fokussierbarkeit der Laser sowie die Optimierung der Wellenlängen und Bandbreiten des Laserlichts. Zur gezielten Lenkung der erzeugten Lichtstrahlen benötigt es darüber hinaus ein präzises System aus zahlreichen Spiegeln, Linsen und weiteren optischen Komponenten. Im Fokus der Forschenden stehen diesbezüglich die eingesetzten Materialien. Sie müssen, insbesondere wenn sie mit Neutronen aus der Brennkammer in Kontakte kommen, sehr widerstandsfähig sein. Denn starke Teilchen- und Strahlungseinflüsse können einerseits ihre Materialstrukturen schädigen und andererseits zur Bildung von Farbzentren auf den Optiken führen, die das Laserlicht teilweise absorbieren und so die Durchlässigkeit der Linsen senken. [40; 119; 17; 112] Eine weitere bisher unbeantwortete Frage der Trägheitsfusion ist die **Herstellung** der hohen Stückzahl an hochqualitativen **Targets**. Keine der existierenden Anlagen erfüllt die Anforderungen einer Massenproduktion, auch weil der Forschungsfokus gegenwärtig noch auf der Suche nach dem passenden Design der Targets liegt. Die Anlagen sind bisher entsprechend auf kleine Stückzahlen und Flexibilität statt auf große, standardisierte Mengen ausgerichtet. [17; 120; 87]

Sowohl in Testanlagen als auch perspektivisch in Fusionskraftwerken muss die **Brennstoffbestückung** in das Innere der Brennkammer mit ausreichender Frequenz²⁴ und Genauigkeit erfolgen, um eine kontinuierliche Brennstoffzufuhr und damit den Plasmaerhalt sicherzustellen. Das Einbringen könnte grundsätzlich über Gaspistolen oder elektrostatische beziehungsweise elektromagnetische Methoden realisiert werden. Bei der

²⁴ Für die genannte Beschussrate von 10 bis 20 Schüssen pro Sekunde (10 bis 20 Hertz) entspräche das für ein Trägheitsfusionskraftwerk einem Bedarf von rund 860.000 bis 1,3 Millionen Targets pro Tag [17].

Magnetfusion ist die Bestückung einfacher, weil der Brennstoff in Form gefrorener Kügelchen direkt in das Plasma geschossen wird. Für die Trägheitsfusion muss die Ausrichtung der brennstofftragenden Behälter beim Indirect-drive-Verfahren beziehungsweise die der Brennstoffkügelchen beim Direct-drive-Verfahren hingegen äußerst präzise sein, weil sich ohne eine gleichmäßige Röntgenstrahleneinwirkung beziehungsweise einen gleichmäßigen Laserbeschuss die Fusionsbedingungen nicht einstellen. Bei beiden Verfahren bedarf es darüber hinaus einer besonders gleichmäßigen Oberfläche der Brennstoffkügelchen, weil ansonsten die symmetrische Energieverteilung während des Laserbeschusses nicht gewährleistet ist, was die Kompression beziehungsweise Zündung beeinträchtigen oder verhindern kann. [121; 17; 21; 25]

Für die Realisierung eines Fusionskraftwerks kann teilweise etablierte **Kraftwerkstechnik** eingesetzt werden. Dies betrifft zum Beispiel die Außenhülle und Kraftwerksteile, die den Strom erzeugen beziehungsweise ins Netz einspeisen (Wärmetauscher, Dampferzeuger, Turbinen, Transformatoren). Bauteile, die in Bezug zum Fusionsprozess, dessen Steuerung und Überwachung stehen, gilt es hingegen neu zu entwickeln und bis zur Serienreife zu bringen. Im Rahmen der Entwicklung sollte dabei idealerweise die (zukünftige) Verfügbarkeit der eingesetzten Stoffe und Materialien berücksichtigt werden.²⁵ [122]

Beim Betrieb eines Fusionskraftwerks entsteht, wenn auch je nach eingesetztem Brennstoffgemisch in unterschiedlicher Intensität, **Neutronenstrahlung**. Wenn sie auf Bauteile trifft, werden diese aktiviert und somit radioaktiv. Daher müssen diese und anliegende Bauteile insbesondere zum Schutz der Mitarbeitenden so konstruiert, angeordnet und ansteuerbar sein, dass bei Bedarf eine **Fernwartung** oder ein automatisierter Austausch möglich ist. Die Erarbeitung entsprechender Lösungen beinhaltet auch die Entwicklung geeigneter Werkzeuge. Erste Erfahrungen wurden diesbezüglich mit Testreaktoren wie zum Beispiel JET gemacht. Ein kommerzieller Betrieb bedarf allerdings noch einmal deutlich kürzerer Wartungs- und Austauschzeiten. [20; 123; 17] Eine modulare Bauweise ist dabei selbst für einige stark integrierte Bauteile wichtig, weil sie wegen der hohen Belastungen im Reaktorinneren im Laufe der anvisierten Kraftwerkslebensdauer mit Zyklen von 2 bis 10 Jahren zu tauschen sind.²⁶

6.3 Materialien

Die hohen Temperatur-, Druck- und/oder Neutronen- beziehungsweise Röntgenstrahlenbelastungen stellen an die verwendeten Materialien speziell im Reaktorinneren sehr hohe Ansprüche an die Widerstandsfähigkeit und Zuverlässigkeit. Das gilt für die Magnet- und die Trägheitsfusion gleichermaßen. Betroffen sind neben Sensor- und Detektionsgeräten insbesondere strukturelle Bauteile, die direkt mit dem Plasma oder mit Strahlung wechselwirken, wie die erste Wand im Vakuumgefäß, das Blanket und der Divertor.²⁷ [124] Über Letzteren werden bei Magnetfusionsanlagen die Reaktionsprodukte sowie Verunreinigungen aus dem Reaktorinneren entfernt, das heißt er kommt direkt mit dem äußeren Bereich des Plasmas in Kontakt. Um die Wärmebelastung an der Reaktorinnenwand und von Bauteilen zu senken, werden unterschiedliche Ansätze verfolgt, die einerseits auf eine gezielte Auswahl von widerstandsfähigen Materialien wie zum Beispiel Wolfram und Spezialstähle und andererseits auf die Kühlung und Stabilisierung des Plasmarands (radiative

²⁵ Helium wird aktuell zum Beispiel nur in wenigen Staaten gefördert, weitgehend aus Erdgas gewonnen und zeitweise als kritischer, das heißt begrenzt verfügbarer Rohstoff eingeordnet [105; 122]. Durch den Verzicht auf Erdgas im Rahmen der Defossilisierung des Energiesystems könnten Bezugsquellen wegfallen und Kreislauf- beziehungsweise Recyclingansätze relevanter werden.

²⁶ Entler et al. sprechen diesbezüglich von 4,5 bis 10,5 Jahren bei Komponenten, die Neutronenstrahlung ausgesetzt sind (Kraftwerksbetrieb: 40 Jahre) [123]. Bei Häfner et al. sind es für die innere Wand und das Blanket 3 bis 5 Jahre [17]. Andere Expert:innen rechnen beim Blanket mit einem Tausch alle 5 Jahre und beim besonders belasteten Divertor etwa alle 2 Jahre. (Expert:innenaussage IPP)

²⁷ Die thermischen Belastungen an den Reaktorinnenwänden können kurzzeitig im Megawattbereich pro Quadratmeter liegen und mit bis zu 20 Megawatt pro Quadratmeter damit den gegenwärtigen technischen Grenzwert um das Doppelte übersteigen [20; 124; 17]

cooling) sowie eine optimierte Divertorform setzen, die eine möglichst großflächige Verteilung der Energiebelastung ermöglicht. [20; 116; 17; 124; 97]

Hohe Temperaturen, Drücke und Strahlungsbelastungen können nicht nur Oberflächen beschädigen, sondern auch zu veränderten mechanischen oder thermischen Materialeigenschaften bis hin zur Materialermüdung führen. Durch Neutronenanregung oder chemische Prozesse können beispielsweise Gase (unter anderem Helium, Wasserstoff) entstehen, die Blasenbildung und gegebenenfalls ein Aufbrechen, Verspröden oder Anschwellen von Materialien verursachen. Aus Abtragungen können darüber hinaus Stäube resultieren, die bei der Trägheitsfusion eine gleichmäßige Verteilung des Laserlichts negativ beeinflussen oder bei der Magnetfusion die Zündung des Plasmas behindern und somit entsprechend zu vermeiden sind.

Eine besondere Herausforderung für die Materialentwicklung ist das begrenzte Erfahrungswissen. Die Materialien und Bauteile können bisher in der Regel nicht unter ihren eigentlichen Einsatzbedingungen getestet werden. Computersimulationen sowie Materialtests mit Teilchenbeschleunigern oder Experimente in bestehenden Testreaktoren und teils auch in Kernspaltungskraftwerken, wenn es um die Widerstandsfähigkeit gegenüber Strahlung geht, gewähren erste Erkenntnisse. Strukturelle Materialveränderungen lassen sich jedoch schwer per Computer simulieren und die Größendimensionen zukünftiger Kraftwerksbauteile sind nicht mit Testreaktoren abzubilden. Umso wichtiger ist daher die Entwicklung leistungsstarker Neutronenquellen, mit denen die Materialien gezielt auf ihre Eignung und Langlebigkeit in einer neutronenstrahlungsbelasteten Umgebung geprüft werden können. Weltweit gesehen können zwar einige der bestehenden Anlagen Neutronen mit einer Energie von 14,1 Megaelektronenvolt (MeV) produzieren, dies jedoch nicht mit der für Materialprüfungen notwendigen Neutronenfluenz. Letztere gibt Aufschluss über die Intensität des Neutronenfeldes und damit über die Belastung, die durch die Neutronen auf die Werkstoffe ausgeübt wird. In Europa wird gegenwärtig eine hochenergetische, leistungsfähige Elektronenquelle in Spanien bei Granada gebaut (IFMIF-DONES). Sie soll Mitte der 2030er in Betrieb gehen und unter anderem im Rahmen der Realisierung des Testreaktors DEMO zur Anwendung kommen. Außerdem ist in Japan, ebenfalls im Rahmen der Forschungsaktivitäten für DEMO, der Aufbau einer vergleichbar leistungsstarken Neutronenquelle zur Materialprüfung in Rokkasho (A-RNS) geplant. [20; 17; 97; 125; 126; 127; 128]

6.4 Brennstoffe

Ein Großteil der gegenwärtigen Fusionskonzepte arbeitet mit den Wasserstoffisotopen Deuterium und Tritium als Brennstoff. Tritium bringt neben dem Vorteil der guten Reaktionsfähigkeit allerdings auch zwei wesentliche Herausforderungen mit sich: die Beschaffung und die Entsorgung von Bauteilen, mit denen es in Wechselwirkung gestanden hat.

Im Gegensatz zu Deuterium, das aus Wasser gewonnen werden kann und damit ausreichend zur Verfügung steht, kommt das radioaktive Tritium kaum natürlich vor.²⁸ Es ist ein Betastrahler, hat eine Halbwertszeit von 12,3 Jahren und entsteht vorrangig durch die Interaktion zwischen kosmischer Strahlung und dem Stickstoff der Atmosphäre sowie in kleineren Anteilen durch Wechselwirkungen in lithiumhaltigen Gesteinen. [125, S. 316] Die weltweiten zivilen Tritiumreserven werden auf lediglich 30 bis 40 Kilogramm geschätzt, was deutlich unter dem jährlichen Tritiumbedarf eines Fusionskraftwerks mit einer Leistung von 1 Gigawattstunde (thermisch) von rund 56 Kilogramm liegen würde.²⁹ [129; 42] Aktuell gibt es keine Anlagen, die Tritium in diesen

²⁸ Ähnlich verhält es sich mit Helium-3 (^3He), einem alternativen Fusionsbrennstoff, das in der Natur ebenfalls nur sehr selten vorkommt und künstlich durch den Zerfall von Tritium gewonnen wird. Bor ist im Vergleich zu diesen häufiger zu finden. Dessen Hauptgewinnungsgebiete liegen in Chile, China, Russland und den USA [125; 42]

²⁹ [129] spricht für ein Fusionskraftwerk mit einer thermischen Leistung von 1 Gigawatt (GW_{th}) von einer verfeuerten Brennstoffmenge von rund 56 Kilogramm Tritium und von 37 Kilogramm Deuterium pro Jahr. Bei [42] sind es für ein 3-GW_{th}-Kraftwerk 170 Kilogramm Tritium, was den 56 Kilogramm bei 1 GW_{th} entspricht. Bei gleichem Verhältnis würde ein 3-GW_{th}-Kraftwerk folglich 111 Kilogramm Deuterium pro Jahr benötigen.

Mengen bereitstellen können. Die einzige relevante zivile Quelle sind gegenwärtig Schwerwasserreaktoren des Typs CANDU, also Kernspaltungskraftwerke, bei denen als Nebenprodukt Tritium aus dem als Moderator verwendeten schweren Wasser (D_2O) gewonnen werden kann. Von diesen existierten 2011 weltweit 30 bis 35 Anlagen, insbesondere in Kanada (21), die zusammen nur rund 1,8 Kilogramm Tritium pro Jahr hätten herstellen können. [130]

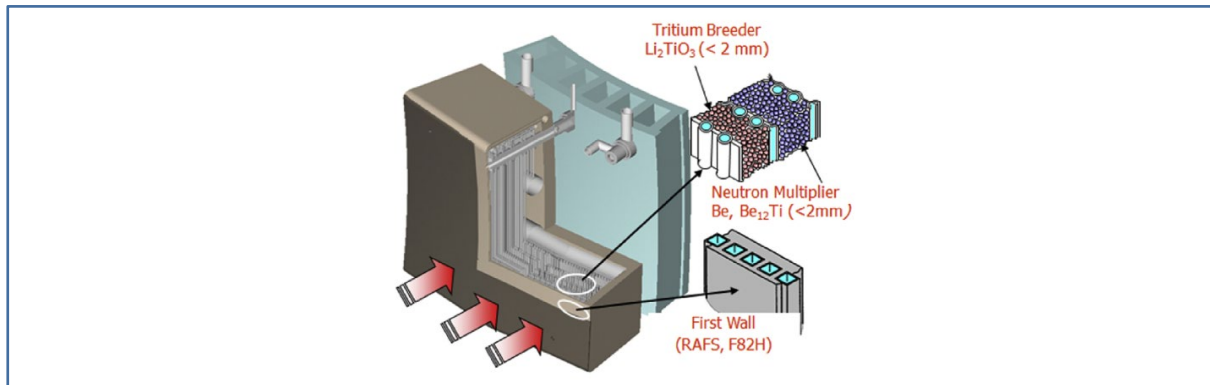


Abbildung 12: Schematischer Ausschnitt eines Konzepts der Blanket-Wand mit der inneren Wand (First Wall), der Schicht für das Tritiumbrüten (Tritium Breeder) inklusive Neutronenmultiplikator (Neutron Multiplier) und der dahinter liegenden Kühlung: wassergekühltes Konzept mit Beryllium als Neutronenmultiplikator; Quelle: Abdou et al. 2015, S. 6, CC BY-NC-ND 4.0 Deed [131]

Um die benötigte Menge an Tritium bereitzustellen, wird daran geforscht, Tritium in der Fusionskammer direkt zu erzeugen und so perspektivisch eine Selbstversorgung von Kraftwerken mit diesem Brennstoff zu ermöglichen. Das sogenannte Erbrüten (engl. breeding) von Tritium erfolgt, indem im Blanket hinter der ersten Wand aus dem Plasma freigesetzte Neutronen mit Lithium³⁰ reagieren (siehe Abbildung 11). Um für das Erbrüten eine ausreichende Zahl an Neutronen gewährleisten zu können, kommen Lithium und Neutronenmultiplikatoren zum Einsatz, wobei als Multiplikator bevorzugt auf Beryllium gesetzt wird, Blei käme aber auch infrage. Bevor das Tritium dem Brennstoffkreislauf zugeführt werden kann, muss es zunächst aus dem entstehenden Stoffgemisch abgeschieden und gereinigt werden. Mehrere in der Entwicklung befindliche Konzepte des Tritiumbrütens sollen in den Testreaktoren ITER und DEMO erstmals zur Anwendung kommen, um so auf ihre Eignung und Effizienz getestet werden. [132; 125; 42; 20]

Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zum Tritiumbrüten beziehen sich bisher auf Blanket-Konzepte für Magnetfusionsreaktoren. Allerdings ist geplant, die gewonnenen Erkenntnisse gleichfalls in Trägheitsfusionsreaktoren zu verwenden. Tritiumbrüter sollen entsprechend auch dort Teil des – bisher noch nicht erarbeiteten – multifunktionalen Blanket-Konzepts werden. [17] Unabhängig vom Reaktorkonzept verhält es sich beim alternativen Brennstoff Helium-3 (^3He) ähnlich: Es ist das Zerfallsprodukt von Tritium und kommt damit ebenso auf der Erde nicht in den benötigten Mengen vor. Wie Tritium müsste es daher gezielt – in diesem Fall durch Fusionsprozesse – erzeugt werden.

6.5 Abfallmanagement

Durch die bei den meisten Kernfusionsreaktionen freigesetzten Neutronen entstehen radioaktive Abfälle. In welchem Ausmaß und ob gegebenenfalls auch hochradioaktive Abfälle dabei sind, hängt von den im Reaktorinneren verwendeten Materialien ab. Große Mengen an hochradioaktiven Abfällen werden bei der Kernfusion jedoch nicht anfallen, das heißt die Abfälle werden überwiegend bis vollständig schwach- bis

³⁰ Zum Einsatz kommen aktuell die stabilen Lithiumisotope Lithium-6 (^6Li) und Lithium-7 (^7Li), wobei Lithium-6 wegen der geeigneteren physikalischen Prozesseigenschaften und der höheren Affinität zur Tritiumbildung gegenwärtig bevorzugt eingesetzt wird.

mittelradioaktiv sein.³¹ Im Vergleich zu den hochradioaktiven Abfällen aus Kernspaltungskraftwerken, die insbesondere durch abgebrannte Brennstäbe entstehen [133], wären die Einlagerungs- beziehungsweise Abklingzeiten für Abfälle der Fusionskraftwerke deutlich geringer. Studien rechnen meist mit Abklingzeiten von rund 100 statt mit 100.000 Jahren wie bei der Kernspaltung. [99; 17; 20] Um das zu erreichen, ist unter anderem eine gezielte Materialauswahl notwendig, bei der zum Beispiel Spezialstähle zum Einsatz kommen, die sich schwerer aktivieren lassen beziehungsweise die keine potenziell langlebigen radioaktiven Isotope bilden. [20; 99]

Neben den aktivierten Reaktorbauteilen stellt Tritium die zweite wesentliche radioaktive Quelle bei Fusionskraftwerken dar, da es sich teils in Bauteilen ablagert. Durch eine Dekontamination ausgetauschter Bauteile und stillgelegter Kraftwerke ließe sich die Strahlenbelastung verringern. Allerdings sollten darüber hinaus auch weitere Ansätze zur Anwendung kommen, beispielsweise eine gezielte Auswahl der verwendeten Materialien, verringerte Verweilzeiten des abgebrannten Brennstoffs in der Reaktorkammer und Recyclingmaßnahmen. Bei Fusionskraftwerken würde, bedingt durch die Größe der kontaminierten Kraftwerksbestandteile, mengenmäßig mehr radioaktiver Abfall als bei Kernspaltungskraftwerken entstehen.³² [99; 17]

6.6 Regulierung

Die Einführung und Kommerzialisierung von Fusionskraftwerken bedarf eines **verlässlichen Rechtsrahmens**. Das beinhaltet die Zuordnung von Zuständigkeiten zu Regulierungs- und Aufsichtsbehörden sowie die Setzung von Standards zur Genehmigung und zum Betrieb von Kernfusionsanlagen. Ein entsprechender Rechtsrahmen existiert gegenwärtig in Deutschland nicht, allerdings gibt es Aktivitäten zur Schaffung eines solchen, beispielsweise in Kanada, den USA, Großbritannien, der EU im Rahmen des ITER-Projekts und bei der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEA). Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass die Regulierung vorrangig auf nationaler Ebene erfolgen wird, wobei zugleich – ähnlich wie bei den IAEA-Prozessen zur Kernspaltung – eine freiwillige, kooperationsbasierte Harmonisierung der nationalen Vorgaben angestrebt wird. [134]

Die Fusions-Community spricht sich klar dafür aus, dass der Rechtsrahmen **speziell für die Kernfusion** entwickelt wird und nicht über die Regulierung zur Kernspaltung erfolgt. Denn beide Technologien weisen zwar Ähnlichkeiten wie zum Beispiel das Auftreten von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen, die Abführung großer Wärmemengen und eine notwendige Begrenzung von Freisetzungen intern wie extern auf, es gibt aber auch wesentliche Unterschiede. Zu diesen zählen unter anderem die nicht vorhandenen spaltbaren Reaktionsprodukte bei Kernfusionsreaktionen, passive Sicherheiten durch die physikalischen Prinzipien der Kernfusion, ein anderes radioaktives Inventar und unterschiedliche Freisetzungspfade von kritischen Stoffen. Sie führen insgesamt zu einem niedrigeren Risiko für Zwischenfälle beziehungsweise bei Unfällen und damit zu einem geringen Gefährdungspotenzial als bei der Kernspaltung (siehe auch Abschnitt 1.2). Hinsichtlich des technischen Regelwerks ist davon auszugehen, dass sich die Regulierung an Sicherheitskonzepten von Anlagen mit radioaktivem Inventar orientiert und das Konzept der gestaffelten Sicherheitsebenen (Defence in depth) Berücksichtigung findet. Zu den kernfusionspezifischen Anforderungen gehören beispielsweise der Einsatz von Tritium sowie Standards für den Umgang mit starken elektromagnetischen Feldern, kryogenen Bauteilen und hochenergetischen Lasern. [97; 134; 135; 17; 136]

Über sicherheitsbezogene Vorgaben hinaus wird auch bei **Arbeitsschutz- und Umweltaspekten** Regelungsbedarf bestehen, denn in Fusionskraftwerken werden zusätzlich zum meist eingesetzten radioaktiven

³¹ Mengenmäßig bilden diese auch bei Kernspaltungskraftwerken den Hauptteil der anfallenden Abfälle.

³² Bezogen auf den Reaktorkern ist sie zum Beispiel beim geplanten Forschungsreaktor DEMO mit rund 10.000 Tonnen etwa viermal so hoch wie bei dem in Entwicklung befindlichen natriumgekühlten schnellen Brutreaktor der Vierten Generation (European sodium-cooled fast reactor/ESFR), wo sie bei etwa 2.500 Tonnen liegt. [99]

Tritium auch verschiedene giftige Stoffe wie beispielsweise Beryllium oder Blei zur Anwendung kommen, die im täglichen Umgang oder bei Störfällen die menschliche Sicherheit und/oder Umwelt beeinträchtigen können. Tritium selbst ist radioaktiv, aber vergleichsweise ungefährlich für Menschen und die Umwelt. Im Wasser und anderen Substanzen wird es leicht durch das häufigste Wasserstoffisotop (^1H) ersetzt. Außerdem enthalten die im radioaktiven Zerfall freigesetzten Elektronen (Betastrahlung) vergleichsweise wenig Energie. Die biologische Halbwertszeit, die angibt, wie schnell ein vom Körper aufgenommenes Radionuklid wieder ausgeschieden wird, ist darüber hinaus mit 10 Tagen für tritiumhaltiges Wasser und 40 Tagen für organisch gebundenes Tritium gering. Es müsste in großen Mengen aufgenommen werden, damit es zu gesundheitlichen Einschränkungen kommt.³³ [134; 137; 100; 138; 139; 100]

Vor dem Hintergrund des bisher begrenzten Erfahrungswissens muss der **Rechtsrahmen iterativ** ausgearbeitet werden, um den jeweils aktuellen Kenntnisstand im Bereich der Fusionsforschung widerspiegeln und identifizierten rechtlichen Anpassungsbedarf berücksichtigen zu können. Weil die Entwicklungsarbeiten im Rahmen bestehender nationaler wie internationaler rechtlicher Vorgaben, Normen und Sicherheitsstandards stattfinden, an die Konstrukteure, Forschungsanlagenbetreiber, Aufsichtsbehörden und ähnliche gebunden sind, existieren für zahlreiche Prozesse bereits Vorgaben, auf denen aufgesetzt werden kann. Dazu zählen zum Beispiel auf Vorgaben, Erfahrungen und qualifiziertes Personal aus dem Kraftwerksbereich, Anlagenbau sowie dem allgemeinen Umgang mit Lasern, hohen Drücken, Radioaktivität und Gefahrenstoffen. Der frühe Entwicklungsstand und die lange Zeit bis zu einer möglichen Realisierung eines Fusionskraftwerks bringen darüber hinaus den Vorteil mit sich, dass bei der Konzeption von Bauteilen, Materialien und Kraftwerksanlagen regulierungsrelevante Fragen bereits mitgedacht werden können. Das betrifft zum Beispiel die Arbeitssicherheit, die Reduktion radioaktiver Abfälle und Recyclingansätze. So können unter anderem über eine Begrenzung der Menge kritischer Stoffe, Fernwartungs- und Monitoringansätze sowie die Integration zusätzlicher Schutzvorkehrungen die Betriebssicherheit gestärkt und Umwelt- sowie Proliferationsrisiken³⁴ gesenkt werden. [97; 134; 17]

Die **Proliferationsrisiken** von Fusionskraftwerken fallen im Vergleich zu Kernspaltungsreaktoren geringer aus. Risiken ergeben sich bei der Kernfusion vorrangig durch die Bereitstellung von Tritium, das auch in Kernwaffen verwendet wird, sowie durch die gezielte Nutzung der bei Fusionsreaktionen entstehenden Neutronen. Zusammen mit Deuterium dient Tritium als Brennstoff in Wasserstoffbomben – außerdem wird es in geboosteren Atombomben als Explosionsverstärker eingesetzt. Ein weiterer proliferationsrelevanter Punkt ist, dass in einem Fusionskraftwerk durch den Neutronenbeschuss theoretisch spaltbares in waffenfähiges Material überführt werden kann (zum Beispiel $^{238}\text{Uran}$ in $^{239}\text{Plutonium}$ oder $^{232}\text{Thorium}$ in $^{233}\text{Uran}$), das dann als Kernwaffenbrennstoff eingesetzt werden könnte. Allerdings würde es sich im Vergleich zu bestimmten Kernspaltungskraftwerkstypen um eher geringe Mengen an spaltbarem, waffenfähigem Material handeln, das auf diese Weise zu gewinnen wäre. Zudem könnte eine missbräuchliche Nutzung der Fusionskraftwerke über verschiedene Detektionsverfahren nachgewiesen werden, insofern Überwachungsinstitutionen wie beispielsweise die IAEA Zugang zu den Anlagen hätten. Um Proliferationsrisiken im Zusammenhang mit Fusionskraftwerken zu reduzieren, sollten missbräuchliche Verwendungen mitgedacht und entsprechende Gegenmaßnahmen entwickelt oder implementiert werden. Ansätze bilden hier zum Beispiel die Bestimmung der Hintergrundstrahlung in der Nähe von Kühlkreisläufen, integrierte Vorrichtungen beziehungsweise Prozesse zur

33 Laut dem Grenzwert der Weltgesundheitsorganisation (WHO) für Tritium, der bei 10.000 Becquerel pro Liter liegt, müsste man ein Jahr lang täglich zwei Liter Wasser mit diesem Grenzwert trinken, um eine Strahlendosis von 0,1 Millisievert (mSv) zu erreichen [138]. Zum Vergleich, die durchschnittliche natürliche Strahlenexposition in Deutschland liegt bei 2,1 mSv pro Jahr [139]. Für den Testreaktor ITER wurde eine Strahlendosis von 50 mSv als Evakuierungsgrenzwert gesetzt. In einer Simulation mit verschiedenen Unfallszenarien für verschiedene Tokamak-Kraftwerkstypen wurde dieser jeweils nicht erreicht und deutlich unterschritten. [100]

34 Proliferation bezeichnet die Weitergabe oder Weiterverbreitung von Massenvernichtungswaffen beziehungsweise entsprechend relevanten Technologien und Bauteilen. Ziel ist hier in der Regel, sie zu unterbinden oder zumindest zu begrenzen.

Untersuchung der eingehenden Materialien sowie eine qualitative oder mengenmäßige Bestimmung der Reaktionsprodukte. Um Risiken besser abschätzen und diesen gezielt begegnen zu können, sind unter anderem detailliertere ingenieurtechnische Bewertungen der Zeit für den Austausch von Blanket-Modulen, in denen spaltbares Material in den Reaktor eingebracht werden kann, sowie bis zum Neustart von Fusionskraftwerken, der bei einem missbräuchlichen Austausch von Modulen notwendig wäre, hilfreich. Ein genaueres Verständnis der Techniken zur Extraktion von Plutonium oder Uran aus dem Kühlsystem des Blankets könnten ebenfalls zur Minderung von Proliferationsrisiken beitragen. Perspektivisch könnten auch kritische Bauteile als Dual-Use-Güter deklariert werden, sodass sie einer Ausfuhrkontrolle unterliegen, was allerdings für eine Kommerzialisierung eher hinderlich sein würde. [140; 141; 142; 17]

7 Zeithorizont: Bis wann umsetzbar?

Am Ansatz, die Kernfusion zur Energiegewinnung einzusetzen, wird seit den 1950er-Jahren geforscht [143]. Aktuell existieren verschiedene Forschungsanlagen, aber noch keine Fusionskraftwerke. Eine erste Realisierung im aktuellen oder kommenden Jahrzehnt ist nicht auszuschließen, aber unwahrscheinlich: Zahlreiche Expert*innen halten einen Zeitraum von 20 bis 25 Jahren für möglich, bis ein erstes Fusionskraftwerk Strom ins Netz einspeist. Einzelne, insbesondere aus dem Start-up-Bereich, sprechen teilweise von deutlich kürzeren Realisierungszeiten, die im Bereich von 10 bis 15 Jahren liegen sollen, was die Mehrheit als unrealistisch erachtet – nicht zuletzt auch, weil die Errichtung des Kraftwerks selbst Jahre in Anspruch nimmt. Ob es sich bei den Vorhersagen zunächst um ein Demonstrationskraftwerk oder bereits um ein erstes kommerziell verfügbares Kraftwerk („first of a kind“) handelt, dazu gehen die Einschätzungen auseinander. [85; 112; 152; 68]

Bei der Einordnung dieser Aussagen³⁵ ist einerseits zu berücksichtigen, dass ambitionierte Zeitpläne von einem Wettbewerb um finanzielle Ressourcen und/oder öffentliche Aufmerksamkeit beeinflusst sein können. [144; 145; 146] Außerdem sind die Abschätzungen dazu, bis wann ein erstes Fusionskraftwerk seinen regulären Betrieb aufnehmen könnte, mit großen Unsicherheiten verbunden. Zu den Gründen dafür zählen die Komplexität der Technologie, zahlreiche noch zu erarbeitende technische Lösungen bezüglich der Reaktorkomponenten, Materialien, Kühlsysteme, Brennstoffe, Schutzeinrichtungen (siehe Kapitel 5) und dass Vergleichs- beziehungsweise Beispielanlagen bisher fehlen, die betriebliches Erfahrungswissen mit sich bringen würden. Angesichts der gegebenen Unsicherheiten ist folglich nicht ausgeschlossen, dass die Kernfusion erst Jahrzehnte später zum Einsatz kommen kann oder auch ein Durchbruch letztlich nicht gelingt.

Für eine Realisierung des ersten netzeinspeisenden Fusionskraftwerks innerhalb der nächsten 20 bis 25 Jahre sprechen neben den wissenschaftlichen Erfolgen der letzten Jahre (zum Beispiel Leistungsabfuhr beim Tokamak, erfolgreiche Laserfusionszündung mit Energiegewinn am NIF im Dezember 2022, Energie rekord im Oktober 2023 mit dem Tokamak JET) die zahlreichen parallelen Entwicklungsaktivitäten an Forschungsinstituten sowie eine zunehmende Zahl an Start-ups in diesem Feld inklusive der damit verbundenen belebenden Konkurrenz. Förderlich sind zudem die deutlich gestiegenen eingeworbenen und bereitgestellten Finanzmittel (siehe Abschnitt 4.2 und Kapitel 9). [112; 67; 21; 17]

Würden Fusionskraftwerke im Umfang der häufig anvisierten 1 bis 2 Gigawatt elektrischer Leistung pro Kraftwerk (siehe Kapitel 5) realisiert, zählten sie zu den Großkraftwerken. Großprojekte tendieren häufig zu Bauverzögerungen und Kostensteigerungen (siehe auch Kapitel 8). Sie können zum Teil deutlich ausfallen und dies trifft auch auf Projekte im Energiesektor zu. [147³⁶; 148] Für zukünftige Zeit- und Kostenplanungen ist neben Verzögerungen beim Bau außerdem zu berücksichtigen, dass bei den bisherigen Forschungsarbeiten zur Kernfusion die Zeitangaben für die Bewältigung der zu erreichenden technologischen Fortschritte beziehungsweise für die anlagentechnischen Aufbauzeiten tendenziell optimistisch ausfallen. [42; 98] Vor dem Hintergrund zunehmender Konkurrenzen um Forschungskapazitäten und finanzielle

³⁵ Hinzuweisen ist in diesem Zusammenhang auch auf den Umstand, dass die Bewertung von Realisierungschancen, Umsetzungszeiträumen, Kostannahmen et cetera dadurch erschwert wird, dass Studien, Fachartikel und Beiträge zur Kernfusion strukturell bedingt einen Bias hinsichtlich der Umsetzungspotenziale aufweisen können. Akteure, die über die notwendigen fachlichen Kenntnisse und das entsprechende Forschungswissen verfügen, um den Status quo und die Entwicklungschancen der Kernfusion beziehungsweise ihrer jeweiligen Technologiekonzepte angemessen bewerten zu können, arbeiten in der Regel selbst in diesem Gebiet oder sind in Kernfusionsprojekte direkt oder indirekt eingebunden. (siehe auch [98; 144]) Es ist bekannt, dass Technology Forecast durch Expert*innen ganz allgemein Urteilsverzerrungen, wie etwa dem positiven Framing, bei dem die positiven Implikationen der Technologie im Vordergrund stehen, oder dem sogenannten Desirability bias, der die Überschätzung der Wahrscheinlichkeit positiver Entwicklungsbedingungen beschreibt, unterliegen. [145] Erklären lässt sich dies psychologisch [146] (Tversky & Kahnemann 1981). Eine besondere Sensibilität sollte bei der Analyse daher dafür gegeben sein, dass Parameter, Bewertungen und so weiter, die den Vorhersagen zugrunde liegen, nicht nur mit Unsicherheiten verbunden sind, sondern gegebenenfalls – bewusst oder unbewusst – wohlwollender ausfallen können. Im Gegensatz zu etablierten Technologien fällt bei der Kernfusion als hochkomplexer Technologie und zugleich Objekt der Grundlagenforschung außerdem – ebenfalls strukturell bedingt – die kritische Bewertung auf Basis von Erfahrungen aus dem alltäglichen Anlagenbetrieb beziehungsweise einer fachlich ausreichend geschulten Öffentlichkeit bisher weg.

³⁶ Hier bezogen auf öffentliche geförderte Projekte.

Mittel infolge einer gestiegenen Anzahl an Akteuren in diesem Feld könnte dieser Trend anhalten. Zu optimistische Annahmen könnten Verzögerungen begünstigen, auf der anderen Seite aber auch zu einer schnelleren Projektumsetzung durch mehr Wettbewerb führen.

Nach Ansicht vieler Fachleute ist die Realisierung eines ersten netzeinspeisenden Fusionskraftwerks innerhalb von 20 bis 25 Jahren herausfordernd und gelingt nur dann, wenn alle zu bearbeitenden Einzelaspekte eng miteinander verzahnt werden und die beteiligten Akteure zielorientiert zusammenarbeiten. Das beinhaltet auch, dass Entwicklungsprozesse beschleunigt, abgestimmt und parallelisiert werden müssen.³⁷ [149] Beispielsweise brauchte es bisher von der frühen Phase der Entwicklung eines Materials für das Reaktorinnere bis zu dessen Zertifizierung für den Einsatz unter Betriebsbedingungen inklusive atomrechtlicher Genehmigung rund 30 Jahre. [97] Es bedarf eines herausfordernden, schrittweise verlaufenden, iterativen Entwicklungsprozesses an zum Teil konkurrierenden Konzepten und mit parallel zueinander stattfindenden Forschungsarbeiten zu einzelnen technischen Lösungen sowie einer Skalierung in mehreren Teilschritten.

Ob eine Kommerzialisierung im anvisierten Zeitraum erfolgreich ist, hängt neben projektbezogenen Aspekten auch entscheidend von den Randbedingungen ab, zu denen unter anderem das Einwerben der notwendigen finanziellen Mittel, die Ausarbeitung eines verlässlichen, gleichwohl anpassungsfähigen Regulierungssystems und die Erarbeitung von rechtlich und gesellschaftlich akzeptablen Sicherheitskonzepten zählen (siehe Kapitel 5 und 8). Um den zukünftigen Bedarf an Spezialist*innen zu decken, gilt es aus Sicht von Fusionsexpert*innen, speziell auf diesen Bereich zugeschnittene Curricula zu entwickeln und außerdem entsprechende Forschungscluster oder Nachwuchsgruppen sowie internationale Austauschformate für Akademiker*innen und Techniker*innen zu etablieren beziehungsweise zu unterstützen. Je weiter sich der Fokus der Entwicklungen dabei von der Grundlagenforschung hin zur angewandten Forschung und Umsetzung verschiebt, desto mehr sind neben Wissenschaftler*innen auch Ingenieur*innen, Planer*innen und potenzielle Kraftwerksbetreiber gefragt. [17; 21; 85; 68] Die Ausarbeitung beziehungsweise Etablierung entsprechender Programme und Curricula, die sich nicht nur in einem regulatorischen, sondern auch in einem gesellschaftlichen Rahmen bewegen wird, wird unter anderem zeitliche Ressourcen in Anspruch nehmen, die bei der Aufstellung des ambitionierten Zeitplans hin zur Realisierung eines ersten Fusionskraftwerks zu berücksichtigen sind.

³⁷ Kritisch wird in diesem Zusammenhang auch auf die Erfahrungen mit dem Testreaktor ITER geschaut: Sein Bau ist gegenwärtig das weltweit größte und teuerste Fusionsprojekt (18 bis 22 Milliarden Euro laut [26]) Die Inbetriebnahme war ursprünglich für 2016 geplant und wurde bereits mehrfach verschoben, zuerst auf 2025, dann auf 2035 und nun soll die Betriebsphase mit Deuterium und Tritium 2039 starten. [26; 149; 95; 60] Neben verschiedenen technischen Problemen wird allerdings darauf hingewiesen, dass es sich bei ITER um ein wissenschaftliches, international aufgestelltes Kooperationsprojekt handelt, das zum Teil von politisch-nationalstaatlichen Interessen mitgeprägt wird. Neben den besonderen Finanzierungsbedingungen ergaben sich daraus auch Verzögerungen im Rahmen der Entwicklung und Fertigung sowie logistische Herausforderungen. So werden die Einzelteile des Reaktors in unterschiedlichen Ländern entwickelt und produziert – auch um möglichst vielen Partnern Wertschöpfungsgewinne zu ermöglichen – und müssen anschließend nach Frankreich gebracht werden. Insofern ist ITER nur bedingt mit einem kommerziellen Projekt zu vergleichen. Dennoch verdeutlichen Planung und Bau der Testanlage die Herausforderungen, die als relevantes Erfahrungswissen mit in die Realisierung eines ersten Kraftwerks genommen werden können. [26; 149]

8 Potenzielle Einbettung ins Energiesystem

Mit dem von Fachleuten als möglich erachteten Umsetzungszeitraum von 20 bis 25 Jahren wird die Kernfusion keinen relevanten Beitrag zum Erreichen der Klimaziele für 2045 in Deutschland beziehungsweise 2050 in Europa leisten können. Im Falle einer Einführung trifft sie dann auf ein Energiesystem, das maßgeblich vom Einsatz erneuerbarer Energien (EE), dezentralen Versorgungsstrukturen und Importen von synthetisch erzeugten Kohlenwasserstoffen und anderen Wasserstoffderivaten geprägt sein wird. In diesem neu aufgestellten System muss sich die Kernfusion als wettbewerbsfähig erweisen. Der prognostizierte steigende globale Strombedarf [150; 103] könnte für einsatzreife Fusionskraftwerke in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts allerdings unter anderem in wirtschaftlichen Ballungszentren eine Chance darstellen.

8.1 Kosten der Stromerzeugung als entscheidender Faktor

Um zu bewerten, ob der Einsatz der Kernfusion im künftigen Energiesystem wirtschaftlich vorteilhaft wäre, reicht es nicht aus, ausschließlich die Stromgestehungskosten (levelized cost of electricity, LCOE), die anlagenbezogen sind, zu betrachten, also diejenigen Kosten, zu denen Fusionskraftwerke Strom ins Netz einspeisen würden. Für eine sichere Energieversorgung sind vielmehr die **Gesamtsystemkosten** entscheidend. Sie umfassen die Stromgestehungskosten ebenso wie die Kosten für Speicher, Netze und Verbrauchsanlagen. In einer Studie des Akademienprojekts „ESYS“ wurde unter Berücksichtigung der Systemkosten unter anderem auch die Rolle der Kernfusion untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz von Fusionskraftwerken aus Systemperspektive nur dann sinnvoll sein wird, wenn ihre Kosten einen bestimmten Schwellenwert unterschreiten, dessen konkreter Wert von vielen Faktoren mitbestimmt wird. Erreicht werden müssen danach Gesamtkosten bis zum produktionsbereiten Kraftwerk von etwas unter 10.000 Euro pro Kilowatt elektrischer Nettoleistung. [151]

Wie teuer Strom aus Fusionskraftwerken sein wird und in welchem Umfang damit Fusionskraftwerke wirtschaftlich zum Einsatz kommen könnten, lässt sich aus heutiger Sicht allerdings nicht zuverlässig beantworten. [152; 42; 98] Zu den Gründen zählen unter anderem die **Unsicherheit** darüber, ob eine Kommerzialisierung der Technologie gelingt, welche Kraftwerkskonzepte letztlich zur Anwendungsreife gebracht werden, der lange Zeitraum bis zu einer Realisierung und die Frage, wie sich die Kosten weiterer Technologien zur klimaneutralen Energieversorgung bis dahin entwickeln. Mit Blick auf den prognostizierten langen Realisierungszeitraum müssen parallel dazu die zukünftigen Dynamiken bei der Entwicklung der klimafreundlichen beziehungsweise -neutralen Konkurrenztechnologien wie beispielsweise der Photovoltaik oder von Energiespeichertechnologien im Blick behalten werden, denn sie werden die wirtschaftlichen Aussichten von Fusionskraftwerken mitbestimmen. Letztlich können auch geopolitische Entwicklungen mehr oder minder direkt Einfluss auf die Kostenstruktur nehmen beziehungsweise zumindest den Rahmen der Technologieentwicklung beeinflussen: So ist unklar, inwieweit in den nächsten Jahrzehnten Wissen international geteilt und Forschungsansätze verfügbar gemacht werden, wie sich politische Spannungen, Krisen und Kriege unter anderem auf die Energiewirtschaft auswirken oder in welchem Maß die Energiewende und der Klimawandel als politisch relevante Fragen eingestuft und bearbeitet sowie die für deren Bearbeitung notwendigen Mittel und Infrastrukturen bereitgestellt werden.

Trotz dieser gegebenen Unsicherheiten gibt es erste **Abschätzungen zu den Stromgestehungskosten** zukünftiger Fusionskraftwerke, die eine erste Orientierung bieten: In einer Überblicksstudie, die verschiedene Reaktordesigns von Fusionskraftwerken betrachtet, liegt die Spanne der LCOE zwischen 40 und 165 Dollar

je Megawattstunde, was rund 38 bis 157 Euro pro Megawattstunde³⁸ entspricht.³⁹ [153; 154] Ob sich die niedrigen LCOE der dargestellten Kostenbandbreite erreichen lassen, ist unklar. Es gibt Risikofaktoren, die eher für eine Einordnung im mittleren bis oberen Bereich sprechen: Die Kernfusion ist eine grundsätzlich neue Technologie. Sie würde zunächst mit einzelnen Anlagen und kaum Erfahrungswissen zum Betrieb in den Wettbewerb mit etablierten Arten der Stromgewinnung treten. Daher ist zumindest am Anfang davon auszugehen, dass die LCOE sich im oberen Bandbreitenbereich bewegen werden.⁴⁰ Darüber hinaus werden Fusionskraftwerke im Fall einer Realisierung der meist anvisierten 1 bis 2 Gigawatt elektrischer Leistung zu den Großkraftwerken und damit ihr Bau zu Großprojekten zählen. Kostka und Anzinger zeigen in ihrer sektorübergreifenden Analyse auf, dass in Deutschland die Mehrkosten für öffentliche Großprojekte im Energiesektor mit am höchsten ausfallen und insbesondere Pionierprojekte mit dem Risiko deutlicher Kostensteigerungen verbunden sind.⁴¹ [147] Im Fall von deutlichen Kostensteigerungen und/oder hohen Einstiegskosten wären die ersten Fusionskraftwerke daher voraussichtlich auf staatliche Förderungen, Zuschüsse oder Abnahmegarantien angewiesen, um einen Markteintritt zu erreichen. Insofern absehbar ist, dass aufgrund von Erfahrungswissen und der Economy of Scale eine Wirtschaftlichkeit zu erreichen ist, ist ein solches Vorgehen nicht unüblich, die Einführungskosten sollten dann aber möglichst breit auf die verschiedenen potenziellen Nutzer*innen der Technologie verteilt werden. Inwieweit Lerneffekte, bautechnisch einfachere Anlagenkonzepte und die gezielte Nutzung von Abwärme zu Kostendegressionen beitragen können, muss abgewartet werden.

8.2 Mögliche Anwendungsfelder

Aufgrund der hohen Investitionskosten und den vergleichbar geringen Betriebs- und Brennstoffkosten, müssten Fusionskraftwerke mit hohen Volllaststunden betrieben werden, damit sie ihre Kosten decken können. Dies ist anders als beispielsweise bei Gaskraftwerken, bei denen die Brennstoffkosten einen erheblichen Anteil an den Gesamtkosten ausmachen. Der Betrieb von Fusionskraftwerken wäre damit **vergleichbar mit heutigen Grundlastkraftwerken**. [155; 67]

Neben der Deckung des Strombedarfs dicht besiedelter Regionen und energieintensiver Industriestandorte werden weitere perspektivische **Anwendungsfelder** von Fusionskraftwerken bei der Meerwasserentsalzung, dem Abscheiden von CO₂ aus der Luft (Direct Air Capture – DAC) und der elektrolytischen Herstellung von Wasserstoff gesehen. [98] Für die erstgenannten Einsatzbereiche können sie aufgrund ihrer kontinuierlichen Energiebereitstellung und einer integrierten Abwärmenutzung eine interessante Option darstellen. Für die Wasserstoffherstellung ist gegenwärtig davon auszugehen, dass bei vorhandenem Strom aus erneuerbaren Energien die Wasserstoffelektrolyse mit EE-Strom in der Regel wirtschaftlicher sein wird,

³⁸ Bei einem Umrechnungskurs für 2022 von 1 Dollar = 0,9509 Euro [153]

³⁹ Die bei Griffiths et al. genannte LCOE-Bandbreite wird von weiteren Studien gestützt, wobei die untere Grenze dort jeweils noch etwas höher angesetzt ist. [123] nennen eine Bandbreite von 75–160 Dollar je Megawattstunde (\$/MWh) (= 64–136 €/MWh bei einem Umrechnungskurs von 1 US-Dollar = 0,8473 Euro für 2018 – siehe [153], wobei hier die LCOE für die fossilen Energien im Vergleich zu Griffith et al. niedriger und die für die erneuerbaren tendenziell höher ausfallen. Die Vergleichsangaben zur Stromproduktion bei Entler et al. widersprechen jedoch teils deutlich den Annahmen der IEA für die LCOE der erneuerbaren Energien und der Kernspaltung für 2030 und 2050 (siehe [150, unter anderem Tabelle auf S. 201]). Die Atomkraft liegt dort über den Zahlen von Entler et al. 2018, die Erneuerbaren hingegen im unteren Bereich der Bandbreiten von Griffiths et al. und stützen somit die Aussage von Letzteren. [154] sprechen für die Kernfusion von 80–100 \$/MWh (= 74–92 €/MWh bei einem Umrechnungskurs von 1 \$ = 0,9248 € für 2023 – siehe [153], wobei der Einstieg zunächst vermutlich bei um die 150 \$/MWh (= 139 €/MWh) liegen wird.

⁴⁰ Für ein Demonstrationskraftwerk modellieren [123] zum Beispiel weit über dem Marktpreis liegende und damit ohne Förderung nicht wettbewerbsfähige LCOE von rund 160 \$/MWh (= 136€/MWh bei einem Umrechnungskurs von 1 \$ = 0,8473 € für 2018 – siehe [153]).

⁴¹ Von insgesamt 170 betrachteten Projekten der sektorübergreifenden Studie sind 10 dem Bereich Energie zuzuordnen. Als allgemeine Gründe für die identifizierten Kostensteigerungen nennen die Autor*innen unter anderem die Schnittstellenkomplexität bei Großprojekten, unvorhersehbare (technologische) Herausforderungen zu Projektbeginn, einen zu ausgeprägten Optimismus bei der Projektplanung sowie unzureichende Governance-Modelle bei der erstmaligen Implementierung von Technologien. Letztere führen unter Umständen zum Beispiel zu unklaren Verantwortlichkeiten und Risikoverteilungen beziehungsweise zu falsch gesetzten Anreizen für Unternehmen. [147]

auch wenn damit eine geringere Auslastung der Elektrolyseure verbunden wäre.⁴² [156] Durch den Einsatz von Fusionskraftwerken könnte sich die Herstellung von Wasserstoff dennoch teilweise nach Deutschland verlagern, sodass dessen Importanteil gesenkt werden könnte. [151]

8.3 Integration in ein von erneuerbaren Energien geprägtes Energiesystem

Weil EE-Anlagen tendenziell einen kürzeren Lebenszyklus als Großkraftwerke aufweisen (eher 20 bis 30 statt 40 bis 60 Jahre) und deren Ausbau kontinuierlich erfolgt, ergibt sich ein steter Erneuerungsbedarf im Anlagenpark, der grundsätzlich die Möglichkeit bietet, **erzeugerseitig** eine neue wettbewerbsfähige Technologie **zu integrieren**. Allerdings werden bei einem eventuellen Markteintritt der Kernfusion ab Mitte des Jahrhunderts auch die Übertragungs- und Verteilnetze sowie Speicher- und Importinfrastrukturen im Energiesektor neu geordnet und errichtet sein. Ihr Ausbau orientiert sich strukturell an einem steigenden Anteil an erneuerbaren Energien, wird also kleinräumiger ausgerichtet sein und kann damit die Integration eines neu hinzukommenden Großkraftwerktyps gegebenenfalls erschweren oder behindern.

Bei ausreichender „innersystemischer“ **Flexibilität** können große Kraftwerke bilanziell auch in ein solches, durch fluktuierende Erzeugung geprägtes Energiesystem integriert werden. [151] Für ausreichend Flexibilität im Stromsystem können neben Speichern und dem Wasserstoffsystem eine verstärkte Digitalisierung und damit eine schnellere und effizientere Datenverarbeitung, eine gezielte Steuerung des privaten, industriellen und dienstleistungsbezogenen Verbrauchsverhaltens und ein noch stärker verknüpftes, geografisch breit aufgestelltes europäisches Stromnetz beitragen. Eine Integration von Fusionskraftwerken kann dazu führen, dass Nachfrageüberschüsse seltener auftreten, weil mit ihnen das Stromangebot insgesamt erhöht wird und eine kontinuierliche Verfügbarkeit insbesondere auch in Zeiten hoher Nachfrage und geringer anderer Erzeugung gegeben wäre. [155; 151]

In Ländern, die weiterhin auf **Großkraftwerke** und insbesondere Kernkraft setzen, könnten Fusionskraftwerke in Konkurrenz zu Kernspaltungskraftwerken treten. Aufgrund eines deutlich geringeren Strahlungsrisikos bei Unfällen, kürzeren Abklingzeiten der radioaktiven Abfälle und einer damit möglicherweise verbundenen höheren Akzeptanz könnten Fusionskraftwerke bisherige Kernspaltungskraftwerke sukzessive ersetzen. Die Integration von Fusionskraftwerken stieße in diesen Ländern nur auf geringe Hürden. Hinzu kommt, dass nach aktuellem Konzeptstand die Brennstoffe für Fusionskraftwerke in Teilen nicht importiert, sondern vor Ort erzeugt werden könnten sowie langfristig verfügbar wären, was einen weiteren Vorteil gegenüber der Kernspaltung darstellt. Einige Studien gehen davon aus, dass die Kernfusion darüber hinaus insbesondere für Länder, die nur über geringe Flächenpotenziale für erneuerbare Energien verfügen, eine wertvolle Option sein kann. [157; 158]

Weil die Kernfusion eine anspruchsvolle und kapitalintensive Technologie ist, rechnen Expert*innen nicht damit, dass sie bei einer Kommerzialisierung umgehend in zahlreichen Ländern zur Anwendung kommt. Vielmehr gehen sie davon aus, dass insbesondere die Länder, die gegenwärtig auch die Kernspaltungstechnologie dominieren, ihre Erfahrungswerte aus der Anwendung dieser Hochtechnologie beziehungsweise dem Umgang mit radioaktiven Materialien einbringen und zu den Erstanwendern zählen werden. Entsprechend würde sich der Einsatz der Kernfusion zunächst auf wirtschaftsstarke Industrie- und Schwellenländer (beispielsweise USA, Frankreich, China, Indien) konzentrieren. Ein Export in weitere Schwellen- und gegebenenfalls auch

42 So ergeben sich mit einem Elektrolyseur für 500 Euro je Kilowatt elektrische Leistung (€/kW_{el}) und Strom für 4 Cent je Kilowattstunde (ct/kWh) über 2000 Stunden pro Jahr die gleichen Gestehungskosten für den Wasserstoff wie mit Strom für 6 ct/kWh über 7500 Stunden pro Jahr. Auch Handley et al. weisen darauf hin, dass Strom aus Fusionskraftwerken zur Wasserstoffproduktion per Elektrolyse nicht wettbewerbsfähig ist, sofern Strom aus erneuerbaren Energien ausreichend zur Verfügung steht [156]

Entwicklungsländer wird erst in der zweiten oder dritten Generation gesehen, für den Fall, dass die hohen Investments der ersten Kraftwerksgeneration spürbar gesenkt werden können. [158; 98]

9 Fazit und Ausblick

Die Kernfusion wäre im Fall ihrer Einführung eine emissionsarme Stromquelle, die die Unabhängigkeit von Energieimporten sowie die Wettbewerbsfähigkeit des Industriestandorts Deutschland beziehungsweise Europa stärken könnte. Ob und wann ihre Kommerzialisierung gelingt, ist aus heutiger Sicht nicht zuverlässig zu beantworten. Welche Rolle die Kernfusion in einem zukünftigen Energiesystem spielen wird, hängt entscheidend von den Kosten ab, zu denen die Kraftwerke den Strom bereitstellen können. Ein wirtschaftlicher Betrieb könnte aus derzeitiger Sicht mit Kosten im unteren Bereich der heute prognostizierten LCOE-Bandbreiten möglich werden, wenn die alternativen klimaneutralen Stromerzeugungs- und Speichertechnologien bis zum Markteintritt der Fusionskraftwerke nicht spürbare Kostendegressionen aufweisen. Etabliert sich die Kernfusion als neue Technologie, böte sich für die beteiligten Unternehmen und Zulieferer die Chance, als Technologieführer international neue Märkte zu erschließen. Wirtschaftliche Vorteile können sich allerdings auch schon früher ergeben, zum Beispiel durch Spin-offs, Zweitverwertungen und Patente, die aus den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten resultieren.

Ein weiteres Engagement für die Kernfusionsforschung ist vor diesem Hintergrund sinnvoll, wenngleich mit Blick auf die Erreichung der Klimaneutralität für Deutschland bis 2045 und Europa bis 2050 bei der Umgestaltung des Energiesystems nicht auf sie gewartet werden darf. Das Engagement für die Kernfusion darf also die anderweitigen Bemühungen für ein klimaneutrales Energiesystem nicht einschränken, sondern sollte diese ergänzen. Die bereits vorhandenen klimaneutralen Technologien müssen weiterhin gezielt und engagiert ausgebaut werden, um die in Deutschland und Europa gesetzlich festgeschriebene Treibhausgasneutralität zu erreichen.

Gelingen kann die Realisierung eines ersten netzeinspeisenden Fusionskraftwerks nach Meinung von Expert*innen in den nächsten 20 bis 25 Jahren nur dann, wenn Politik und Unternehmen alle notwendigen Schritte parallel verlaufend, in Abstimmung zueinanderstehend und mit vollem Nachdruck verfolgen. Dies betrifft sowohl die technischen Herausforderungen, zu denen unter anderem die technischen Aspekte wie die Weiterentwicklung von Reaktorbauteilen, die Entwicklung widerstandsfähiger Materialien und das Schließen des Brennstoffkreislaufs zählen, als auch die Rahmensetzung mit Themen wie der Regulierung, einem technischen Regelwerk, geeigneten Finanzierungsinstrumenten und der Ausbildung und Sicherung der benötigten Fachkräfte. Gerade durch eine möglichst frühzeitige und vorausschauende Etablierung der regulatorischen Grundlagen können Investitionsrisiken gesenkt werden, was national wie international dazu beitragen kann, Privatkapital von Investor*innen einzuwerben. Nicht nur dafür ist es unerlässlich, die Kernfusion aus der Fachdiskussion in die öffentliche Debatte zu bringen. Breite Gesellschaftsschichten sollten über die Chancen und Risiken der Kernfusion transparent informiert werden, auch um ihnen eine aktive Teilhabe an den zukünftigen Entwicklungsprozessen zu ermöglichen.

Literatur

1 Spektrum.de 1998-1

Spektrum.de: „*Lexikon der Physik*“, 1998. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/> [Stand: 05.07.2024].

2 BASE o. A.-1

Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung: „*Glossar*“, URL: https://www.base.bund.de/DE/service/glossar/_functions/glossar.html [Stand: 09.06.2024].

3 RP-Energie-Lexikon o. A.

RP-Energie-Lexikon: „*RP-Energie-Lexikon*“, URL: <https://www.energie-lexikon.info> [Stand: 10.06.2024].

4 IPP o. A.-1

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik: „*Fusionsforschung im IPP*“, URL: <https://www.ipp.mpg.de> [Stand: 27.05.2024].

5 SWP 2024

Stiftung Wissenschaft und Politik: „*Strategische Souveränität in Energiefragen. Überlegungen zur Handlungs- und Gestaltungsfähigkeit Deutschlands in der EU*“, 2024. URL: <https://www.swp-berlin.org/10.18449/2020A46/> [Stand: 07.08.2024].

6 BMWK o. A.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: „*Glossar Energiewende*“. URL: https://www.bmwk.de/SiteGlobals/BMWI/Forms/Listen/Glossar-Energiewende/Glossar_Formular.html?resourceId=dc77c18f-d6bb-434e-984e-c97acdb51ae7&input_=69fa31e9-1d87-4ef0-8421-5cda8ac3bf16&pageLocale=de&titlePrefix=Alle#form-dc77c18f-d6bb-434e-984e-c97acdb51ae7 [Stand: 22.06.2024].

7 eval.at o. A.

eval.at: „*Betriebsarten des Lasers*“. URL: <https://www.eval.at/de/lasersicherheit-in-der-ausbildung/1-grundlagen-zu-laser/12-betriebsarten-des-lasers/> [Stand: 22.06.2024].

8 Sicherheit in der Kerntechnik o. A.

Sicherheit in der Kerntechnik: „*Gestaffeltes Sicherheitskonzept*“. URL: <https://www.nuklearesicherheit.de/genehmigungs-und-aufsichtssystem/sicherheitskonzept/gestaffeltes-sicherheitskonzept/> [Stand: 07.08.2024].

9 DIW Berlin 2024

DIW Berlin: „*Kostendegression*“, 2024. URL: https://www.diw.de/de/diw_01.c.413338.de/presse/glossar/kostendegression.html [Stand: 07.08.2024].

10 Umweltbundesamt 2010

Umweltbundesamt: „*Lebenszyklusanalyse: Wie funktioniert das?*“, 2010. URL: https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2010/files/pr/PR_Poelz.pdf [Stand: 07.08.2024].

11 BASE o. A.-2

Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung: „*Kernfusion*“, URL: <https://www.base.bund.de/DE/themen/kt/kta-deutschland/kernfusion/kernfusion.html> [Stand: 09.06.2024].

12 bpb o. A.

Bundeszentrale für politische Bildung: „*Das Politiklexikon*“. URL: <https://www.bpb.de/kurz-knapp/lexika/politiklexikon> [Stand: 07.08.2024].

13 BASE o. A.-3

Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung: „*Basiswissen*“, URL: https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/abfaelle/basiswissen_radioaktivitaet/basiswissen_node.html [Stand: 09.06.2024].

14 BASE o. A.-4

Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung: „*Arten*“, URL: https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/abfaelle/arten/arten_node.html [Stand: 09.06.2024].

15 dpq 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].

16 MIT o. A.

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

17 Haefner et al. 2023

Haefner, C. L./Alexander, N./Betti, R./Hurricane, O./Ma, T./Stieglitz, R./Zohm, H.: „*Memorandum Laser Inertial Fusion Energy*“, BMBF-Expertenkommission zur laserbasierten Trägheitsfusion (Hrsg.), 2023. URL: <https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230522-memorandum-laser-inertial-fusion-energy.html> [Stand: 29.07.2024].

18 Spektrum.de 1998-2

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

19 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.

20 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.

21 BMBF 2023

Bundesministerium für Bildung und Forschung: „Positionspapier Fusionsforschung“, 2023. URL: https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/7/775804_Positionspapier_Fusionsforschung.pdf?__blob=publicationFile&v=5 [Stand: 07.08.2024].

22 LibreTexts o. A.

LibreTexts: „10.3: Nuclear Binding Energy“. URL: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/University_Physics_\(OpenStax\)/University_Physics_III_-_Optics_and_Modern_Physics_\(OpenStax\)/10%3A_Nuclear_Physics/10.03%3A_Nuclear_Binding_Energy](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/University_Physics_(OpenStax)/University_Physics_III_-_Optics_and_Modern_Physics_(OpenStax)/10%3A_Nuclear_Physics/10.03%3A_Nuclear_Binding_Energy) [Stand: 05.08.2024].

23 BASE 2023-1

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: 26.07.2024].

24 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: 26.07.2024].

25 IPP 2024-1

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

26 MPG 2023

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

27 IPP o. A.-2

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik: „Aufbau eines Fusionskraftwerks vom Typ Tokamak“. URL: <https://www.ipp.mpg.de/12215/aufbau> [Stand: 05.08.2024].

28 IPP o. A.-3

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

29 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].

30 Biel et al. 2017

Biel, W./Beckers, M./Kemp, R./Wenninger, R./Zohm, H.: „Systems code studies on the optimization of design parameters for a pulsed DEMO tokamak reactor“. In: *Fusion Engineering and Design*, 123, 2017.

31 IPP o. A.-4

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik: „Plasmaentladungen“. URL: <https://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/exptypen/tokamak/plasmaentladungen/index> [Stand: 12.07.2024].

32 Prater et al. 2002

Prater, R./Petty, C. C./Harvey, R./Lin-Liu, Y. R./Lohr, J. M./Luce, T. C. (Hrsg.): „Physics of Off-Axis Electron Cyclotron Current Drive“, 2002.

33 Moriya et al. 2011

Moriya, Y./Murakami, S./Nagasaki, K.: „Simulation Study of Electron Cyclotron Current Drive in Helical Plasmas“, 2011.

34 Wang et al. 2022

Wang, M./Liu, L./Zhao, L. M./Li, M. H./Ma, W. D./Hu, H. C./Wu, Z. G./Feng, J. Q./Yang, Y./Zhu, L./Chen, M./Zhou, T. A./Jia, H./Zhang, J./Cao, L./Zhang, L./Liang, R. R./Ding, B. J./Zhang, X. J./Shan, J. F./Liu, F. K./Ekedahl, A./Goniche, M./Hillairet, J./Delpech, L.: „Improvement of lower hybrid current drive systems for high-power and long-pulse operation on EAST“. In: *Nuclear Engineering and Technology*, 54, 11, 2022, S. 4102–4110.

35 Kerler 2023

Kerler, W.: „Stellarator statt Tokamak: Proxima Fusion aus Deutschland will das Rennen um die Kernfusion gewinnen“, 2023. URL: https://1e9.community/t/stellarator-statt-tokamak-proxima-fusion-aus-deutschland-will-das-rennen-um-die-kernfusion-gewinnen/19663?utm_source=pocket-newtab-de-de [Stand: 14.07.2024].

36 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].

37 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].

38 Focused Energy o. A.

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

39 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.

40 Betti/Hurricane 2016

Betti, R./Hurricane, O. A.: „Inertial-Confinement Fusion with Lasers“. In: Nature Physics, 12, 5, 2016, S. 435–448.

41 Mortimer/Müller 2015

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

42 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.

43 Manheimer 2020

Manheimer, W.: „Fusion Breeding for Mid-Century, Sustainable, Carbon Free Power“. In: Heliyon, 6, 9, 2020.

44 Martinez-Val et al. 1996

Martinez-Val, J./Eliezer, S./Piera, M./Velarde, G.: „Fusion Burning Waves in Proton-Boron-11 Plasmas“. In: Physics Letters A - PHYS LETT A, 216, 1996, S. 142–152.

45 Magee et al. 2023

Magee, R. M./Ogawa, K./Tajima, T./Allfrey, I./Gota, H./McCarroll, P./Ohdachi, S./Isobe, M./Kamio, S./Klumper, V./Nuga, H./Shoji, M./Ziaei, S./Binderbauer, M. W./Osakabe, M.: „First Measurements of $p(11)B$ Fusion in a Magnetically Confined Plasma“. In: Nature communications, 14, 1, 2023, S.955.

46 Sadin et al. 1989

Sadin, S. R./Povinelli, F. P./Rosen, R.: „The NASA Technology Push Towards Future Space Mission Systems“. In: Acta Astronautica, 20, 1989, S. 73–77.

47 Olechowski et al. 2015

Olechowski, A./Eppinger, S. D./Joglekar, N.: „Technology Readiness Levels at 40: A Study of State-of-the-Art Use, Challenges, and Opportunities“, S. 2084–2094.

48 BLE o. A.

Bundesamt für Landwirtschaft und Ernährung: „Technologiereifegrade“.

49 Prinja/Gonzalez de Vicente 2021

Prinja, N. K./Gonzalez de Vicente, S. M.: „Fusion Specific Technology Readiness Levels“, 2021.

50 Warmer et al. 2017

Warmer, F./Bykov, V./Drevlak, M./Häußler, A./Fischer, U./Stange, T./Beidler, C. D./Wolf, R. C.: „From W7-X to a HELLIAS fusion power plant: On engineering considerations for next-step stellarator devices“. In: Fusion Engineering and Design, 123, 2017, S. 47–53.

51 Sagara et al. 2015

Sagara, A./Wolf, R./Neilson, H.: „Technological Readiness Comparison for Helical and Tokamak DEMO“, hg. von University of Science and Technology of China 2015.

52 Meade 2014

Meade, D.: „Framework for a Road Map to Magnetic Fusion Energy“, hg. von Plasma Science and Fusion Center 2014.

53 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.

54 Barbarino 2020

Barbarino, M.: „A Brief History of Nuclear Fusion“. In: Nature Physics, 16, 9, 2020, S. 890–893.

55 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.

56 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.

57 Abu-Shawareb et al. 2022

Abu-Shawareb et al.: „Lawson Criterion for Ignition Exceeded in an Inertial Fusion Experiment“. In: Physical Review Letters, 129, 7, 2022.

58 Osolin 2024

Osolin, C.: „Fusion Ignition and the Path to Inertial Fusion Energy“. In: The Bridge, 2024, S. 11–14. URL: <https://lasers.llnl.gov/sites/lasers/files/2024-06/the-bridge-fusion-ignition.pdf>

59 Simpson 2024

Simpson, R.: „Inertial Fusion Energy“, 2024. URL: [Simpson_PPPL_IFE_2024.pdf](https://www.pppl.gov/sites/pppl/files/2024-08/Simpson_PPPL_IFE_2024.pdf) [Stand: 05.08.2024].

60 ITER 2024

ITER: „Summary of Presentation by Pietro Barabaschi“, ITER Director-General, 2024.

61 Gibney 2024

Gibney, E.: „*ITER delay: what it means for nuclear fusion*“. In: Nature, 631, 8021, 2024, S. 488–489.

62 IPP o. A.-6

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik: „*Demonstrationskraftwerk DEMO*“. URL: <https://www.ipp.mpg.de/9031/demo> [Stand: 12.07.2024].

63 EUROfusion o. A.-2

EUROfusion: „*The Demonstration Power Plant: DEMO*“. URL: <https://euro-fusion.org/programme/demo/> [Stand: 07.07.2024].

64 EUROfusion 2018

EUROfusion: „*European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy*“, 2018.

65 ITER o. A.-1

ITER: „*What Is Iter?*“ URL: <https://www.iter.org/proj/inafewlines> [Stand: 07.07.2024].

66 IPP 2024-2

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik: „*Kernfusion: Europäisches Gemeinschaftsexperiment erzielt Energierekord*“ (Presseinformation). URL: https://www.ipp.mpg.de/5405998/PIO1_2024_02_08_Fusionsenergierekord_JET_DE.pdf

67 Häfner/Quay 2023

Häfner, C./Quay, R.: „*Öffentliche Anhörung des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung zum Thema - „Fusionsforschung*“, 2023.

68 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].

69 IAEA 2021 o. A.

International Atomic Energy Agency: *FusDIS*, 2021. URL: <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/FusDIS.aspx> [Stand: 08.07.2024].

70 IPP o. A.-7

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik: „*Teilnahme an JT-60SA*“. URL: <https://www.ipp.mpg.de/5267788/jt-60sa> [Stand: 12.07.2024].

71 IPP o. A.-8

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik: „*Mitarbeit am Joint European Torus JET*“. URL: <https://www.ipp.mpg.de/5269137/jet> [Stand: 12.07.2024].

72 Windsor et al. 1999

Windsor, C./Keilhacker, M./Lawson, J. D./Pert, G. J./Robinson, D. C.: „*JET Deuterium: Tritium Results and Their Implications*“. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 357, 1752, 1999, S. 415–442.

73 FIA o. A.

Fusion for Energy: „*First Tokamak Plasma for JT-60SA*“. URL: <https://fusionforenergy.europa.eu/news/first-tokamak-plasma-for-jt-60sa> [Stand: 09.07.2024].

74 QST/FIA o. A.

QST/Fusion for Energy: „*What is JT-60SA?*“ URL: <https://www.jt60sa.org/wp/> [Stand: 07.07.2024].

75 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].

76 IAEA 2022

International Atomic Energy Agency: *World Survey of Fusion Devices 2022*, Vienna, 2022.

77 IPP o. A.-9

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik: *Wendelstein 7-X*. URL: <https://www.ipp.mpg.de/wendelstein7x> [Stand: 12.07.2024].

78 IPP o. A.-10

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik: „*Einführung – der Stellarator Wendelstein 7-X*“. URL: <https://www.ipp.mpg.de/9296/einfuehrung> [Stand: 12.07.2024].

79 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].

80 IPP o. A.-11

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik: *Vergleich helikaler Anlagen*. URL: <https://www.ipp.mpg.de/3867153/Stellaratorvergleich> [Stand: 12.07.2024].

81 IPP o. A.-12

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik: *Fusionsanlage ASDEX Upgrade*.

82 McDermott et al. 2023

McDermott, R. M./Sieglin, B., Wendler, D./Willensdorfer, M.: „*AS-DEX Upgrade Letter*“, München, 2023.

83 BMBF 2024

Bundesministerium für Bildung und Forschung: „Förderprogramm Fusion 2040“, 2024. URL: https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/7/890132_Foerderprogramm_Fusion_2040.pdf?__blob=publicationFile&v=2

84 Herrmann 2019

Herrmann, M.: „An LLNL and National Ignition Facility Perspective“, hg. von National Academy of Sciences 2019.

85 GAO 2023

U.S. Government Accountability Office: „Fusion Energy: Potentially Transformative Technology Still Faces Fundamental Challenges“, 2023. URL: <https://www.gao.gov/products/gao-23-105813> [Stand: 09.07.2024].

86 LMJ 2022

Laser Mégajoule: „Laser Mégajoule“, 2022. URL: <https://www-lmj cea.fr/> [Stand: 04.07.2024].

87 Ma/Betti 2022

Ma, T./Betti, R.: „Report of 2022“. Fusion Energy Sciences Basic Research Needs Workshop, 2022.

88 Tadviser o. A.

Tadviser: „UFL-2M Laser Machine“. URL: https://tadviser.com/index.php/Product:VNIEF:_UFL-2M_laser_machine [Stand: 10.07.2024].

89 LaserNetUS 2024

LaserNetUS: „About LaserNetUS“, 2024. URL: <https://laser-netus.org/about> [Stand: 27.07.2024].

90 Laserlab Europe o. A.

Laserlab Europe: „The Integrated Initiative of European Laser Research Infrastructures“. URL: <https://www.laserlab-europe.eu/front-page> [Stand: 27.07.2024].

91 eli 2024

ELI ERIC, 2024. URL: <https://eli-laser.eu/organisation/eli-eric/> [Stand: 27.07.2024].

92 Shumlak 2020

Shumlak, U.: „Z-pinch fusion“. In: Journal of Applied Physics, 127, 20, 2020.

93 Gala et al. 2023

Galea, C./Thomas, S./Paluszek, M./Cohen, S.: „The Princeton Field-Reversed Configuration for Compact Nuclear Fusion Power Plants“ In: Journal of Fusion Energy: Journal Volume: 42; Journal Issue: 1, 2023. URL: <https://www.osti.gov/pages/biblio/1957531> [Stand: 29.07.2024].

94 Ex-Fusion o. A.

Ex-Fusion. URL: [EX-Fusion / en](https://www.ex-fusion.org/en) [Stand: 29.07.2024]

95 ITER o. A.-2

ITER: „Frequently Asked Questions“. URL: <https://www.iter.org/faq> [Stand: 20.07.2024].

96 generalfusion 2024

generalfusion: „Charting the path to a clean energy future with LM26“, 2024. URL: <https://generalfusion.com/post/charting-the-path-to-a-clean-energy-future-with-lm26/> [Stand: 27.07.2024].

97 Donné 2019

Donné, A. J. H.: „The European Roadmap towards Fusion Electricity“. In: Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 377, 2141, 2019.

98 Griffiths et al. 2022

Griffiths, T./Pearson, R./Bluck, M./Takeda, S.: „The Commercialisation of Fusion for the Energy Market: A Review of Socio-Economic Studies“. In: Progress in Energy, 4, 4, 2022.

99 Gonzales de Vicente et al. 2022

Gonzales de Vicente, S. M./Smith, N. A./El-Guebaly, L./Ciattaglia, S./Di Pace, L./Gilbert, M./Mandoki, R./Rosanvallon, S./Someya, Y./Tobita, K./Torcy, D.: „Overview on the Management of Radioactive Waste from Fusion Facilities: ITER, Demonstration Machines and Power Plants“. In: Nuclear Fusion, 62, 8, 2022.

100 EFDA 2005

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

101 NREL 2021

National Renewable Energy Laboratory: „Life Cycle Assessment Harmonization“, 2021. URL: <https://www.nrel.gov/analysis/life-cycle-assessment.html> [Stand: 11.07.2024].

102 UNECE 2022

United Nations Economic Commission for Europe: Carbon Neutrality in the UNECE Region: „Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources“, Geneva, 2022.

103 IEA 2023

International Energy Agency: „Life Cycle Upstream Emission Factors“ 2023 (Pilot Edition), 2023.

104 IFA 2024

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung: „Helium“, 2024. URL: <https://gestis.dguv.de/data?name=007020> [Stand: 02.07.2024].

105 Elsner/Liedtke 2018

Elsner, H./Liedtke, M.: „*DERA Rohstoffinformationen*“, Berlin, 2018.

106 Schleisner et al. 2001

Schleisner, L./Hamacher, T./Cabal, H./Hallberg, B./Lechon, Y./Korhonen, R./Sáez, R.: „*Energy, Material and Land Requirement of a Fusion Plant*“. In: *Fusion Engineering and Design - FUSION ENG DES*, 58, 2001, S. 1081–1085.

107 Adamovich et al. 2022

Adamovich, I./Agarwal, S./Ahedo, E./Alves, L. L./Baalrud, S./Babaeva, N./Bogaerts, A./Bourdon, A./Bruggeman, P. J./Canal, C./Choi, E. H./Coulombe, S./Donkó, Z./Graves, D. B./Hamaguchi, S./Hegemann, D./Hori, M./Kim, H.-H./Kroesen, G. M. W./Kushner, M. J./Laricchiuta, A./Li, X./Magin, T. E./Mededovic Thagard, S./Miller, V./Murphy, A. B./Oehrlein, G. S./Puac, N./Sankaran, R. M./Samukawa, S./Shiratani, M./Šimek, M./Tarasenko, N./Terashima, K./Thomas Jr, E./Trieschmann, J./Tsikata, S./Turner, M. M./van der Walt, I. J./van de Sanden, M. C. M./Woedtko, T. von: „*The 2022 Plasma Roadmap: Low Temperature Plasma Science and Technology*“. In: *Journal of Physics D: Applied Physics*, 55, 37, 2022.

108 Banacloche et al. 2020

Banacloche, S./Gamarra, A. R./Lechon, Y./Bustreo, C.: „*Socioeconomic and environmental impacts of bringing the sun to earth: A sustainability analysis of a fusion power plant deployment*“. In: *Energy*, 209, 2020.

109 TAE Technologies o. A.

TAE Technologies: „*Breakthrough solutions for the most complex problems*“. URL: <https://tae.com/about-us/> [Stand: 12.07.2024].

110 Princeton Fusion Systems 2024

Princeton Fusion Systems: „*Compact Fusion Reactors*“, 2024. URL: <https://www.princetonfusion.com/about-princeton-fusion-systems/> [Stand: 17.07.2024].

111 MIT o. A.

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

112 Leemans et al. 2023

Leemans, W./Bagnoud, V./Bohnet, I./Günter, S./Lambrecht, A./Schramm, U./Stieglitz, R./Stöhlker, T.: „*The Fusion Energy Options*“, 2023.

113 Kerekeš et al. 2023

Kerekeš, A./Breuning, L./Müller, A. von/Gawlick, J./Warmer, F./Fietz, S./Kempton, R./Ciattaglia, S./Hering, W./Zohm, H./Hamacher, T.: „*Operational Characterization of Tokamak and Stellarator Type Fusion Power Plants from an Energy System Perspective*“. In: *Fusion Engineering and Design*, 190, 2023.

114 F4E o. A.

Fusion for Energy: ITER Toroidal Field Coils.

115 Fasoli 2023

Fasoli, A.: „*Essay: Overcoming the Obstacles to a Magnetic Fusion Power Plant*“. In: *Physical Review Letters*, 130, 22, 2023.

116 Romanelli 2022

Romanelli, F.: „*Fusion Energy: Technological Challenges*“. In: *EPJ Web of Conferences*, 268, 2022, S.13.

117 EUROfusion o.A.-1

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

118 Hartwig et al. 2024

Hartwig, Z. S./Vieira, R. F./Dunn, D./Golfinopoulos, T./LaBombard, B./Lammi, C. J./Michael, P. C./Agabian, S./Arsenault, D./Barnett, R./Barry, M./Bartoszek, L./Beck, W. K./Bellofatto, D./Brunner, D./Burke, W./Burrows, J./Byford, W./Cauley, C./Chamberlain, S./Chavarria, D./Cheng, J./Chicarello, J./Diep, V./Dombrowski, E./Doody, J./Doos, R./Eberlin, B./Estrada, J./Fry, V./Fulton, M./Garberg, S./Granetz, R./Greenberg, A./Greenwald, M./Heller, S./Hubbard, A. E./Ihloff, E./Irby, J. H./Iverson, M./Jardin, P./Korsun, D./Kuznetsov, S./Lane-Walsh, S./Landry, R./Lations, R./Leccacorvi, R./Levine, M./Mackay, G./Metcalfe, K./Moazeni, K./Mota, J./Mouratidis, T./Mumgaard, R./Muncks, J./Murray, R. A./Nash, D./Nottingham, B./O'Shea, C./Pfeiffer, A. T./Pierson, S. Z./Purdy, C./Radovinsky, A./Ravikumar, D. K./Reyes, V./Riva, N./Rosati, R./Rowell, M./Salazar, E. E./Santoro, F./Sattarov, A./Saunders, W./Schweiger, P./Schweiger, S./Shepard, M./Shiraiwa, S./Silveira, M./Snowman, B. F./Sorbom, P./Stahle, P./Stevens, K./Stillerman, J./Tammana, D./Toland, T. L./Tracey, D./Turcotte, R./Uppalapati, K./Vernacchia, M./Vidal, C./Voinin, E./Warner, A./Watterson, A./Whyte, D. G./Wilcox, S./Wolf, M./Wood, B./Zhou, L./Zhukovsky, A.: „*The SPARC Toroidal Field Model Coil Program*“. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 34, 2, 2024, S. 1–16.

119 Tikhonchuk 2020

Tikhonchuk, V. T.: „*Progress and Opportunities for Inertial Fusion Energy in Europe*“. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378, 2184, 2020.

120 Rice et al. 2017

Rice, B. S./Ulreich, J./Fella, C./Crippen, J./Fitzsimmons, P./Nikroo, A.: „*Permeation Fill-Tube Design for Inertial Confinement Fusion Target Capsules*“. In: *High Power Laser Science and Engineering*, 5, 2017.

121 Biener et al. 2009

Biener, J./Ho, D. D./Wild, C./Woerner, E./Biener, M. M./Eldasher, B. S./Hicks, D. G./Eggert, J. H./Celliers, P. M./Collins, G. W./Teslich, N. E./Kozioziemski, B. J./Haan, S. W./Hamza, A. V.: „*Diamond spheres for inertial confinement fusion*“. In: *Nuclear Fusion*, 49, 11, 2009.

122 European Commission et al. 2023

European Commission/Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs/Grohlo, M./Veeh, C.: „Study on the critical raw materials for the EU 2023“ (Final report). Publications Office of the European Union 2023.

123 Entler et al. 2018

Entler, S./Horacek, J./Dlouhy, T./Dostal, V.: „Approximation of the Economy of Fusion Energy“. In: Energy, 152, 2018, S. 489–497.

124 Coenen 2020

Coenen, J. W.: „Fusion Materials Development at Forschungszentrum Jülich“. In: Advanced Engineering Materials, 22, 6, 2020.

125 Rubel 2019

Rubel, M.: „Fusion Neutrons: Tritium Breeding and Impact on Wall Materials and Components of Diagnostic Systems“. In: Journal of Fusion Energy, 38, 3, 2019, S. 315–329.

126 IFMIF-DONES 2022

IFMIF-DONES: „What is“, 2022. URL: <https://ifmif-dones.es/dones-programme/> [Stand: 10.07.2024].

127 Sato et al. 2021

Sato, S./Kasugai, A./Ochiai, K./Masuda, K./Nakamura, M. M./Ohta, M./Oyaidzu, M./Kwon, S./Sakamoto, K./Ishida, S.: „Conceptual design of advanced fusion neutron source (A-FNS) and irradiation test modules“. In: Nuclear Fusion, 61, 10, 2021.

128 Kasugai 2023

Kasugai, A.: „Overview of A-FNS“, Tokyo, 2023.

129 Tanabe 2017

Tanabe, T.: „Tritium“, Tokyo, Springer Japan, 2017.

130 McMorrow 2011

McMorrow, D.: „Tritium“, 2011.

131 Abdou et al. 2015

Abdou, M./Morley, N. B./Smolentsev, S./Ying, A./Malang, S./Rowcliffe, A./Ulrickson, M.: „Blanket/first wall challenges and required R&D on the pathway to DEMO“. In: Fusion Engineering and Design, 100, 2015, S. 2–43.

132 Hasinger 2010

Hasinger, G.: „Stand der Fusionstechnik – Sichere und nachhaltige Energieversorgung“, 2010, 2, S. 3–20.

133 BASE 2023-2

Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung: „Atom-müll in Deutschland: Was? Woher? Wohin?“, Berlin, 2023.

134 Elbez-Uzan et al. 2024

Elbez-Uzan, J./Williams, L./Forbes, S./Dodaro, A./Stieglitz, R./Airila, M. I./Holden, J./Rosanvallon, S.: „Recommendations for the Future Regulation of Fusion Power Plants“. In: Nuclear Fusion, 64, 3, 2024.

135 European Commission/Directorate-General for Energy 2021

European Commission/Directorate-General for Energy: „Study on the Applicability of the Regulatory Framework for Nuclear Facilities to Fusion Facilities – Towards a Specific Regulatory Framework for Fusion Facilities“ Final report: Publications Office of the European Union 2021.

136 Raeder et al. 2013

Raeder, J./Weller, A./Wolf, R./Jin, X./Boccaccini, L. V./Stieglitz, R./Carloni, D./Pistner, C./Herb, J.: „Untersuchung der Sicherheit von Kernfusionskraftwerken hinsichtlich nuklearer Stör- und Unfälle“, 2013.

137 Thomas 2023

Thomas, G.: „Health Risks from Radiation – Fission versus Fusion“. In: Journal of Fusion Energy, 42, 1, 2023, S.20.

138 IN2P3 2024

French National Institute of Nuclear Physics An Particle Physics IN2P3: „Tritium“, 2024. URL: <https://radioactivity.eu.com/articles/phenomenon/tritium> [Stand: 27.07.2024].

139 Bundesamt für Strahlenschutz 2023

Bundesamt für Strahlenschutz: „Ionisierende Strahlung“, 2023. URL: https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/naturliche-strahlung/naturliche-strahlung__node.html [Stand: 27.07.2024].

140 Glaser/Goldston 2012

Glaser, A./Goldston, R. J.: „Proliferation Risks of Magnetic Fusion Energy: Clandestine Production, Covert Production and Breakout“. In: Nuclear Fusion, 52, 4, 2012.

141 Kovari et al. 2018

Kovari, M./Coleman, M./Cristescu, I./Smith, R.: „Tritium Resources Available for Fusion Reactors“. In: Nuclear Fusion, 58, 2, 2018.

142 National Research Council 2013

National Research Council: „Assessment of Inertial Confinement Fusion Targets“, Washington, DC: The National Academies Press, 2013.

143 Wurbs et al. 2024 i.E.

Wurbs, S./Dehlwes, S./Stephanos, C./Fischedick, M./Henning, H.-M./Löschel, A./Matthies, E./Pittel, K./Renn, J./Sauer, D. U./Spiecker genannt Döhmann, I.: „Ist Kernfusion eine Energiequelle der Zukunft?“ (Kurz erklärt!), Schriftenreihe „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS), im Erscheinen 2024. URL: https://doi.org/10.48669/esys_2024-9 [Stand: 05.08.2024].

144 Takeda et al. 2023

Takeda, S./Keeley, A. R./Managi, S.: „How Many Years Away is Fusion Energy? A Review“. In: Journal of Fusion Energy, 42, 1, 2023, S.16.

145 Bonaccorsi et al. 2020

Bonaccorsi, A./Aprea, R./Fantoni, G.: „Expert biases in technology foresight. Why they are a problem and how to mitigate them“. In: *Technological Forecasting and Social Change*, 151, 2020.

146 Tversky/Kahneman 1981

Tversky, A./Kahneman, D.: „The framing of decisions and the rationality of choice“. In: *Science*, 221, 1981, S. 453–458.

Bonaccorsi, A./Aprea, R./Fantoni, G.: „Expert biases in technology foresight. Why they are a problem and how to mitigate them“. In: *Technological Forecasting and Social Change*, 151, 2020.

147 Kostka/Fiedler o. A.

Kostka, G./Fiedler, J.: „Großprojekte in Deutschland – Zwischen Ambition und Realität“. URL: <https://www.hertieschool.org/de/infrastruktur> [Stand: 10.07.2024].

148 Sovacool et al. 2014

Sovacool, B. K./Gilbert, A./Nugent, D.: „An International Comparative Assessment of Construction Cost Overruns for Electricity Infrastructure“. In: *Energy Research & Social Science*, 3, 2014, S. 152–160.

149 Kramer 2023

Kramer, D.: „ITER Appears Unstoppable Despite Recent Setbacks“. In: *Physics Today*, 76, 8, 2023, S. 18–22.

150 IEA 2021

International Energy Agency: „Net Zero by 2050“, 2021.

151 Stöcker et al. 2024 i.E.

Stöcker, P./ Erlach, B./ Wurbs, S./ Stephanos, C./ Fishedick, 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].

152 WD Dt. Bundestag 2019

Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages: „Einzelfragen zur Kernfusionsforschung“, 2019.

153 BMZ o.A.

Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung: Offizieller DAC-Umrechnungskurs. URL: <https://www.bmz.de/de/ministerium/zahlen-fakten/oda-zahlen/hintergrund/dac-umrechnungskurs-35300> [Stand: 30.07.2024].

154 Lindley et al. 2023

Lindley, B./Roulstone, T./Locatelli, G./Rooney, M.: „Can fusion energy be cost-competitive and commercially viable? An analysis of magnetically confined reactors“. In: *Energy Policy*, 177, 2023.

155 Hamacher et al. 2013

Hamacher, T./Huber, M./Dorfner, J./Schaber, K./Bradshaw, A. M.: „Nuclear Fusion and Renewable Energy Forms: Are They Compatible?“. In: *Fusion Engineering and Design*, 88, 6, 2013, S. 657–660.

156 Handley et al. 2021

Handley, M. C./Slesinski, D./Hsu, S. C.: „Potential Early Markets for Fusion Energy“. In: *Journal of Fusion Energy*, 40, 2021.

157 Schwartz et al. 2023

Schwartz, J. A./Ricks, W./Kolemen, E./Jenkins, J. D.: „The Value of Fusion Energy to a Decarbonized United States Electric Grid“. In: *Joule*, 7, 4, 2023, S. 675–699.

158 Gi et al. 2020

Gi, K./Sano, F./Akimoto, K./Hiwatari, R./Tobita, K.: „Potential Contribution of Fusion Power Generation to Low-Carbon Development under the Paris Agreement and Associated Uncertainties“. In: *Energy Strategy Reviews*, 27, 2020.

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

Autor*innen

Sven Wurbs (ESYS-Koordinierungsstelle | acatech), Sonja Dehlwes (ESYS-Koordinierungsstelle | acatech), Dr. Andrea Lübke (acatech), Dr. Cyril Stephanos (ESYS-Koordinierungsstelle | acatech), Philipp Stöcker (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)), Felix Fischer (ESYS-Koordinierungsstelle | acatech), Prof. Dr. Dr. h.c. Siegfried H. Glenzer (SLAC National Accelerator Laboratory (Universität Stanford)), Prof. Dr. Sibylle Günter (Max-Planck-IPP/ EUROfusion), Prof. Dr. Constantin Häfner (RWTH Aachen | Fraunhofer Institut für Lasertechnik | Fraunhofer Gesellschaft), Dr. Alexander von Müller (Max-Planck-IPP), Polina Pienkina (ESYS-Koordinierungsstelle | acatech), Prof. Dr. Markus Roth (Focused Energy | Technische Universität Darmstadt)

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_2024-8

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. In interdisziplinären Arbeitsgruppen erarbeiten rund 160 Expertinnen und Experten Handlungsoptionen für den Weg zu einer umweltverträglichen, sicheren und bezahlbaren Energieversorgung.

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