

Grundlagen, Status quo und Perspektiven der Kernfusion

Dr. Manfred Schroeder

6. Februar 2026

Gliederung

0 Executive Summary

1 Vorbemerkungen

1.1 Warum der Hype um die Kernfusion ?

1.2 Die allgemeinen Vorteile der KF

2. Die Beherrschbarkeit der KF

2.1 Kann die Energieerzeugung mit KF gelingen ?

2.2 Ja, die Sonne zeigt, dass die KF funktioniert

2.3 Ist die Kernfusion auf der Erde wissenschaftlich, technisch und ökonomisch als Quelle für die Stromerzeugung lösbar ?

3. Realisierungskonzepte: Die wichtigsten Verfahren zur Erzeugung von Energie aus Kernfusion (allgemein)

3.1 Magneteinschluss

3.1.1 Magneteinschluss, Projekte

3.1.2 Magneteinschluss, alternative Projekte

3.2 Trägheitsfusion

4. Nationale Strategien und Ambitionen

4.1 USA, Kanada

4.2 Europa

4.3 Asien

4.4 wichtige nationale und internationale Kooperationen

5. Die wichtigsten laufenden Projekte zur Kernfusion

5.1 Magneteinschluss

5.1.2 Basis Tokamak

5.1.3 Basis Stellarator

5.2 Basis Trägheitsfusion

6. Woher der Optimismus für das Gelingen der Kernfusion ?

7. Sicherheit, Radioaktivität

8. Finanzierung, Kosten

9. Rahmenbedingungen in Deutschland

10. Zusammenfassung und Ausblick

Quellen

0 Executive Summary

Die Kernfusion ist eine innovative Energiequelle mit dem Potenzial, eine nahezu unbegrenzte, sichere und klimaneutrale Stromversorgung für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts bereitzustellen. Angesichts des global steigenden Energiebedarfs und der dringlichen Anforderungen für eine Dekarbonisierung der Energieversorgung gewinnt die Forschung an der Kernfusion weltweit zusehends an Bedeutung. Dabei verbindet die Kernfusion die Vorteile der hohen Energiedichte, unbegrenzter Brennstoffe aus Wasserstoffisopen und einer emissionsfreien Energieerzeugung unabhängig von Wetter oder Tageszeit.

Wissenschaftlich ist bewiesen, dass Kernfusion als Energiequelle funktioniert. Die Sonne zeigt es. Technologisch wurden mit Projekten wie ITER, SPARC und der National Ignition Facility (NIF) u.a. bedeutende Fortschritte erzielt, insbesondere bei der Stabilisierung des Plasmas und dem Erreichen des wissenschaftlichen "Break-even"-Punkts. Am "Break-even"-Punkts übersteigt die erzeugte Energie die eingesetzte Energie. Die Technologie ist jedoch noch in der Entwicklung, insbesondere hinsichtlich des kommerziellen Betrieb von Fusionskraftwerken. Dieser wird realistischerweise frühestens ab 2045 erwartet. Die Herausforderungen umfassen technische Stabilität, Materialbelastbarkeit sowie die Wirtschaftlichkeit der Anlagen.

Deutschland und Europa sind in der Kernfusionsforschung gut positioniert, insbesondere durch den Stellarator Wendelstein 7-X, nationale Forschungszentren und private Innovationsprojekte. Globale Wettbewerbssituationen und umfangreiche Investitionen, neben Deutschland vor allem die USA, China und Japan, treiben die Entwicklung voran. Für eine erfolgreiche kommerzielle Umsetzung sind koordinierte Forschungsanstrengungen, finanzielle Investitionen, insbesondere von privaten Geldgebern, sowie eine enge Verzahnung von Wissenschaft, Industrie und Politik notwendig.

Insgesamt stellt die Kernfusion – wenn auch langfristig – einen strategisch wichtigen Baustein für die zukünftige Energieversorgung und technologische Souveränität dar, der langfristig erhebliche Beiträge zur Klimaneutralität und Versorgungssicherheit leisten kann. Der Bericht

empfiehlt, die Forschung konsequent weiterzuführen und politische Rahmenbedingungen so zu gestalten, dass Innovationen und Investitionen gefördert werden [1].

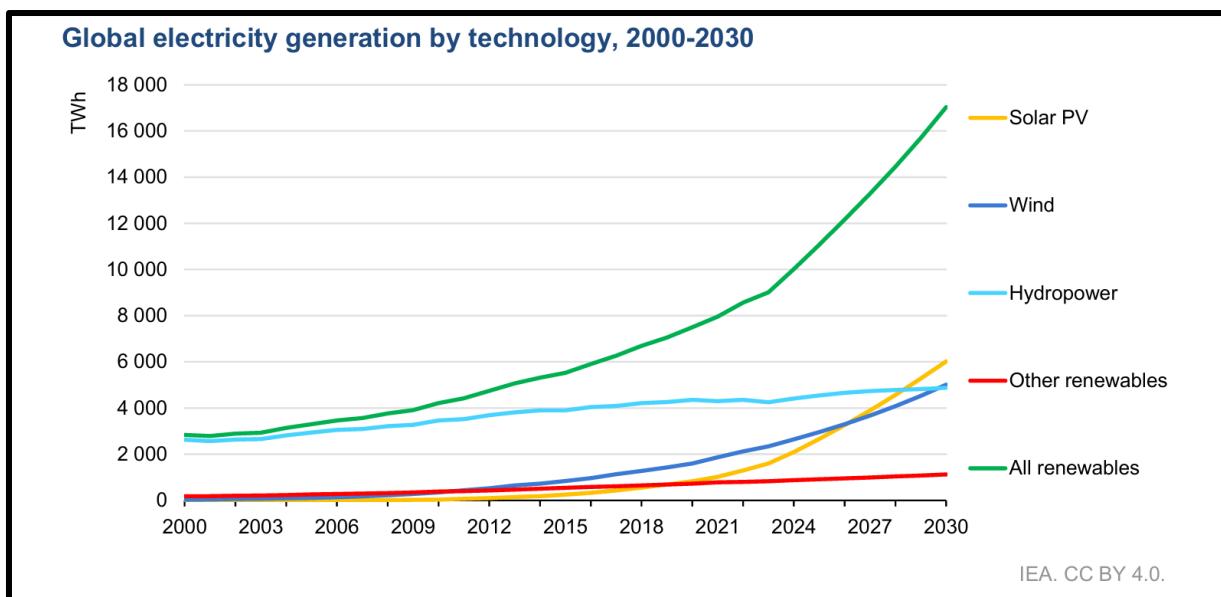
An dieser Stelle sei vermerkt, dass Herrn Dr. Klaus Schlenga (Bruker EAS GmbH, Hanau) unser besonderer Dank gilt für die zahlreichen wichtigen Hinweise und Kommentare und für die kritische Durchsicht des Papiers.

1 Vorbemerkungen

1.1 Warum der Hype um die Kernfusion ?

Der weltweite Energiebedarf wächst kontinuierlich. Die Nachfrage nach elektrischer Energie wird bis 2050 je nach Szenario um das 2- bis 3-Fache steigen. Getrieben wird dieser Anstieg durch Bevölkerungswachstum, steigende Wohlfahrt und neue Technologien: Rechenzentren für künstliche Intelligenz, Elektromobilität, Wärmepumpen und Klimaanlagen treiben diese Entwicklung. [1], siehe Abb. 1.

Abb.1: Globale Stromerzeugung nach erneuerbaren Quellen, 2000 – 2030 [1],



Quelle: IAE CC BY 4.0

Gleichzeitig erfordert der Klimawandel eine ambitioniertere Transformation zu klimaneutralen Energieträgern [2] . Der Ausbau erneuerbarer Energien (Wind und Solar) macht Fortschritte: Ihr weltweiter Anteil lag 2024 bei etwa 30 % der Stromerzeugung und soll bis 2030 auf 46 % steigen [1]. Das ist beachtlich, aber nicht ausreichend. Immer noch liegt der fossile Anteil der weltweiten Primärenergieversorgung bei 80 % in 2022, gegenüber 84 % in 1972 (Abb. 2).

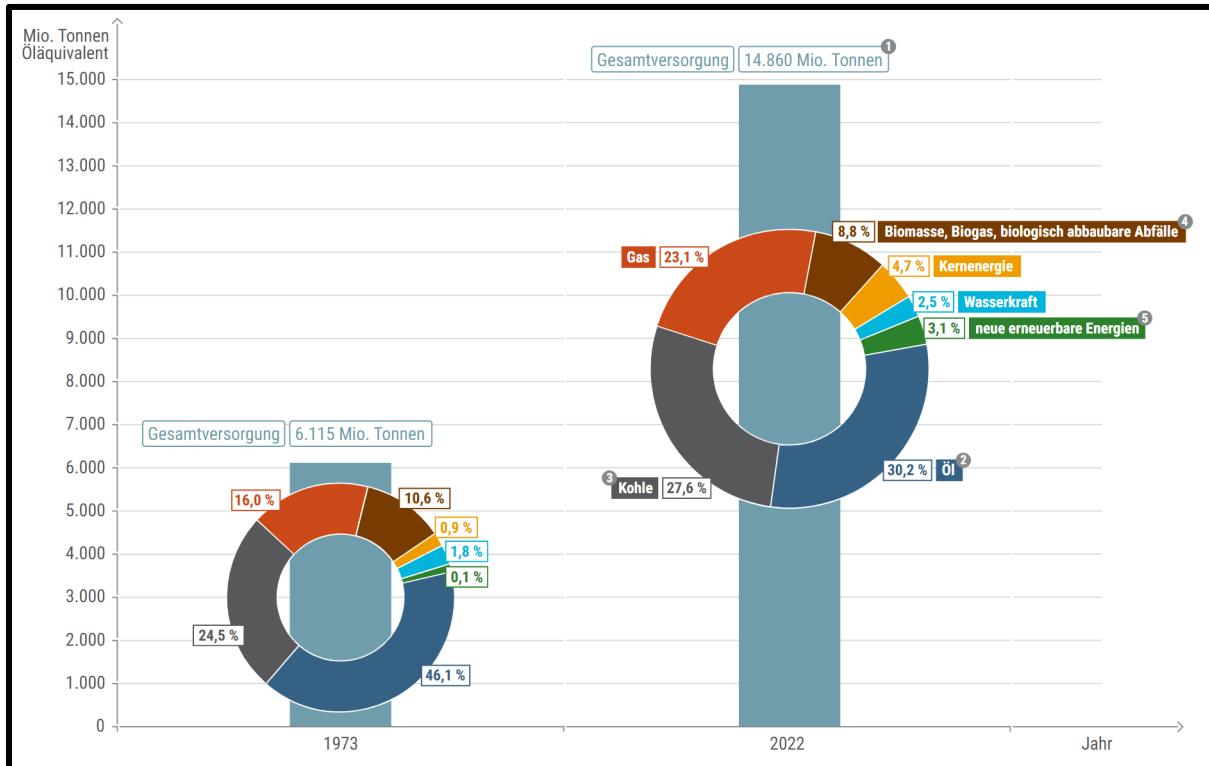
Grenzen der erneuerbaren Energien

Der Ausbau erneuerbarer Energien ist auf einem vielversprechenden Weg. Jedoch zeigen sich zunehmend strukturelle Grenzen:

- Wettervariabilität und Tagesgang: Schwankende Bedingungen und Tag-Nacht-Schwankungen gefährden die ununterbrochene Stromversorgung, besonders für industrielle Volkswirtschaften.
- Dunkelflauten und Nettoinstabilität: Bei hohem Anteil von Wind und Solar entstehen Extremphasen – Dunkelflauten mit Strommangel und Hellbrisen mit Stromüberschuss – die zu Netzinstabilität und regional zu Brown-Outs oder national zu Blackouts führen können.
- Infrastrukturkosten: Der massive Ausbau von Übertragungsnetzen, Verteilnetzen, Stromspeichern und Backup-Kraftwerken verursacht erhebliche Kosten und technische Komplexität.
- Rohstoffengpässe: Der hohe Bedarf an Kupfer und seltenen Erden stößt auf absehbare Grenzen.
- Persistenz fossiler Energieträger und Kernenergie: Die Realität zeigt ein anderes Bild als die Ziele: Bei der Primärenergie lag der fossile Anteil 2022 – 50 Jahre nach 1972 – noch bei 80 % (Abb. 2). Experten prognostizieren weiterhin steigende CO₂-Emissionen aus Kohle und Gas.

Die konventionelle Kernenergie deckt heute nur 4,5 % der weltweiten Primärenergie. Sie befindet sich zwar auf einem Comeback-Kurs und wird zunehmend als klimaneutrales Instrument anerkannt, aber auch hier bestehen Herausforderungen: überzeugende Lösungen für Reaktorsicherheit,endlagerung und Wirtschaftlichkeit sind noch zu entwickeln. Innovationen wie Small Modular Reactors (SMR) [3] und Transmutation von Atommüll sind vielversprechend, aber noch in der Entwicklung.

Abb. 2.: Primärenergieversorgung nach Energieträgern, Anteile in %, weltweit 1973 und 2022 [1],



Quelle: IEA World Energy Balances database © OECD/IEA 2024, www.iea.org/statistics

Anmerkung: Zahlen für 2024: Solar 2,8 %, Wind 3,3 %, Wasser 5,8 %, Kernkraft 4,5, Bio 6,7 %

Deshalb hat sich die Fusionsforschung inzwischen mit einer weltweit selbsttragenden Dynamik entwickelt, angetrieben durch den Wettbewerb zwischen Industrieländern und privaten Risikokapitalgebern. Parallel wächst die politische Unterstützung: Ein Konsortium aus mehreren Ländern entwickelt die größte Kernfusionsanlage ITER, die USA fördern gezielt Demonstrationsanlagen, die EU etabliert einen industriellen Fusionsrahmen und Großbritannien plant den ersten kommerziellen Reaktor (STEP). Die Bundesregierung verfolgt das Ziel, das weltweit erste Fusionskraftwerk in Deutschland zu errichten, siehe „Deutschland auf dem Weg zum Fusionskraftwerk“ [4].

Warum jetzt dieser Schwung?

Drei Faktoren sind zusammengekommen:

1. **Physikalischer Fortschritt:** Technologiesprünge in Hochtemperatursupraleitung, Lasertechnologie, Materialforschung und digitale Simulation verkürzen die Entwicklungswege drastisch.
2. **Private Initiative:** Erstmals wagen privat finanzierte Unternehmen den Schritt vom wissenschaftlichen Konzept zum industriellen Betrieb – was zuvor undenkbar war. Sie erkennen die Kernfusion bereits jetzt in der Frühphase der Realisierung als Wettbewerbsfaktor. Geld steht bei großen IT-Konzernen ausreichend zur Verfügung. Ein Vorsprung auf der Zeitachse könnte zusätzlich gewaltige Sprünge im Firmenwert versprechen.
3. **Geopolitische Notwendigkeit:** Energieversorgungssicherheit und Dekarbonisierung sind wettbewerbsentscheidend. Länder, die in Kernfusion führend sind, gewinnen technologische und wirtschaftliche Vorteile.

Die alte Redewendung, dass Kernfusion »immer 30 Jahre entfernt« sei, verliert an Kraft. Ob und wann sie wirtschaftlich einsetzbar wird, bleibt offen – aber der Wettlauf hat klar begonnen. Für die Energie- und Industriepolitik ist sie zum strategischen Hoffnungsträger geworden [5].

1.2 Die allgemeinen Vorteile der KF:

Die Kernfusion ist vielversprechend, weil sie eine stabile, saubere und nahezu unerschöpfliche Energiequelle darstellen könnte, die unabhängig von Wetterbedingungen ist. Hier sind die wesentlichen Vorteile [5]:

1.2.1 Ressourcenschonung durch unbegrenzte Brennstoffressourcen

Die Brennstoffe für die Kernfusion sind die Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium, siehe dazu **Exkurs 1**. Deuterium kommt reichlich im Meerwasser vor; Tritium lässt sich im Fusionsprozess selbst aus Lithium erzeugen – dessen Verfügbarkeit weltweit als hoch einzuschätzen ist. Das Ergebnis: Die Brennstoffe Deuterium und Tritium sind quasi unbegrenzt verfügbar.

Exkurs 1: Die Brennstoffe der Kernfusion, speziell Tritium

*Allen Voraussagen nach werden die **Brennstoffe für die Kernfusion** die Wasserstoffisotope **Deuterium (D)** bzw. **Tritium (T)** sein.*

*Deuterium ist ein schweres Wasserstoffisotop, das in sehr großen Mengen im Meerwasser vorkommt. Es sind die reaktionsfreudigsten Brennstoffe für die Kernfusion, mit den geringsten Herausforderungen bzgl. der Erfüllung des Lawson Kriteriums (s. **Exkurs 4**).*

*Keine andere Kernfusionsreaktion erreicht bei so „niedrigen“ Temperaturen das Maximum ihrer Reaktionsrate, (siehe Abbildung (4)). Außerdem ist bei der Deuterium-Tritium-Reaktion das Verhältnis aus Energieausbeute und Energieeintrag theoretisch am höchsten. Siehe auch **Exkurs 4**.*

Zur Dimension: Die Verschmelzung von 1 Gramm Deuterium und Tritium erzeugt so viel Energie wie die Verbrennung von 11 Tonnen Kohle – ein energetisches Verhältnis ohne Vergleich.

Zum Vergleich: Die Mengen an Energie aus 1 kg Uran bei der Kernspaltung entspricht 2,7 Millionen kg Kohleäquivalent.

1.2.2 Energieunabhängigkeit durch lokale Produktion

Beide Brennstoffe können grundsätzlich vor Ort bereit gestellt werden: Deuterium durch Abtrennung aus Wasser, Tritium durch Erbrütung im Reaktorbetrieb. Dies eröffnet die Perspektive, Staaten weitgehend von Energieimporten zu entlasten und die geopolitische Abhängigkeiten deutlich zu reduzieren. Aufgrund des hohen natürlichen Vorkommens von Deuterium sowie der Möglichkeit, Tritium mithilfe von Lithium-6 im Fusionsprozess selbst zu erzeugen, sind die Brennstoffe langfristig nicht knappheitsbestimmt. Daraus ergibt sich ein erhebliches Potenzial für eine nachhaltige und zugleich zuverlässige Energiequelle über viele Jahrzehnte bis Jahrhunderte.

Hinzu kommt die außergewöhnlich hohe Energiedichte der Kernfusion, die jene fossiler Energieträger um mehrere Größenordnungen übertrifft: Um die

Energiemenge zu erzeugen, die durch das atomare „Verschmelzen“ von etwa 1 g Wasserstoff (in Form von Deuterium und Tritium) freigesetzt wird, müssten rund 11 t Kohle verbrannt werden (vgl. **Exkurs 1**).

1.2.3 Klimaneutralität

Bei der Kernfusion werden keine fossilen Brennstoffe verbrannt und keine Klimagase wie Methan oder Lachgas erzeugt. CO₂ entsteht nur beim Anlagenbau – ein vernachlässigbarer Anteil im Vergleich zu fossilen Kraftwerken.

1.2.4 Inhärente Sicherheit

Kernfusion ist physikalisch inhärent sicher: Unkontrollierte Kettenreaktionen sind unmöglich. Beim Ausfall der Plasmaheizung kommt die Reaktion sofort zum Erliegen. Schwere Nuklearunfälle wie bei der Kernspaltung sind damit praktisch ausgeschlossen. Etwaige Strahlungsergebnisse wären räumlich auf das Kraftwerksgelände und seine unmittelbare Umgebung begrenzt.

1.2.5 Kurzlebige radioaktive Abfälle

Auch bei Fusionskraftwerken entstehen radioaktive Abfälle, diese sind jedoch kurzlebig und schwach- bis mittel radioaktiv. Sie müssen nach heutiger Planung nur über Zeiträume in der Größenordnung von etwa 100 Jahren sicher gelagert werden, nicht über Jahrtausende. Langfristige Atommüllprobleme wie bei hochradioaktivem Spaltmaterial treten in dieser Form nicht auf.

(Zu 1.2.4 und 1.2.5 siehe Details in **Kapitel 7**)

1.2.6 Grundlastfähigkeit

Fusionskraftwerke wären – ähnlich wie heutige Grundlastkraftwerke – in der Lage, kontinuierlich Strom in das Netz einzuspeisen. Anders als volatile Wind- oder Solaranlagen können sie unabhängig von äußeren Bedingungen eine gleichmäßige Leistung bereitstellen. Dies macht sie für eine stabile Energieversorgung ideal. Der Betrieb von Fusionskraftwerken ist daher vergleichbar mit heutigen Grundlastkraftwerken.

1.2.7 Wettbewerbsfähige Stromkosten

Erste Berechnungen deuten darauf hin, dass die Stromgestehungskosten von Fusionskraftwerken in einer ähnlichen Größenordnung wie heutiger Grundlaststrom liegen könnten. Verlässliche Aussagen sind jedoch erst möglich, wenn kommerzielle Fusionsreaktoren über einen längeren Zeitraum betrieben und evaluiert worden sind.

(Zur Finanzierung und zu Kosten siehe **Kapitel 8**)

Die in den letzten Jahren erzielten Fortschritte geben guten Grund zu der Hoffnung, dass die Realisierbarkeit der Kernfusion wirtschaftlich gelingen kann.

Hinsichtlich der Realisierung ist zwischen 2 Stufen zu unterscheiden:

- **Stufe 1 (Scientific Break-even):**

Nachweis, dass die im Fusionsprozess freigesetzte Energie größer ist als die zur Aufrechterhaltung der Reaktion erforderliche Heizenergie.

- **Stufe 2 (Economic Break-even):**

Der Fusionsreaktor muss eine deutlich positive Gesamtenergiebilanz aufweisen, die über den physikalischen Break-even hinausgeht und sämtliche System-, Betriebs- und Kapitalkosten einschließt.

Wettbewerbsfähigkeit gegenüber etablierten Energieträgern markiert den Übergang zum ökonomischen Break-even.

Fazit: Warum das Momentum jetzt?

Die Realisierung kommerzieller Fusionskraftwerke ist noch weit entfernt. Viele Fachleute rechnen mit 20–25 Jahren bis zu ersten Prototypen. Für keines der bestehenden Fusionskonzepte existiert bislang ein großtechnischer Kraftwerksprototyp, und es gilt nachzuweisen, dass eine solche Anlage nicht nur technisch machbar, sondern auch wirtschaftlich tragfähig ist.

Dennoch: Das Fenster hat sich geöffnet. Die Kombination aus physikalischen Durchbrüchen, privatem Kapitalinteresse und geopolitischem Kalkül hat die Kernfusion vom »ewigen Versprechen« zur »realistischen Option« für die Energieversorgung der zweiten Jahrhunderthälfte gemacht. Dies rechtfertigt, dass das Thema in strategischen Planungen Platz bekommt – als ergänzender Baustein für die Versorgungssicherheit eines klimaneutralen Energiesystems.

2 Die Beherrschbarkeit der Kernfusion

2.1 Kann die Energieerzeugung mit KF gelingen ?

Dieses Kapitel antwortet auf die zentrale Frage: Kann Kernfusion als kontrollierbarer, nutzbarer Energieprozess auf der Erde realisiert werden? Die Antwort basiert auf drei Bausteinen: der physikalischen Machbarkeit, der technischen Umsetzbarkeit und der wirtschaftlichen Tragfähigkeit. Wir zeigen zunächst, wie die Sonne die natürliche bzw. technische Machbarkeit der Kernfusion demonstriert, dann, wie wir es auf der Erde erreichen können, und schließlich welche Hürden noch zu nehmen sind.

2.2 Ja, die Sonne zeigt, dass die KF funktioniert

Kernfusion in der Sonne: Bewährter Prozess

Die Sonne zeigt seit Milliarden Jahren, dass Kernfusion als Energiequelle funktioniert. In ihrem Inneren verschmelzen Wasserstoffkerne bei extremen Bedingungen zu Helium:

- **Temperatur:** ca. 15 Millionen Grad Celsius (Kern)
- **Druck:** ca. 200 Milliarden Bar (durch Eigengravitation)
- **Prozess:** Wasserstoff → Helium (+ Neutron + Energie)

Diese Fusionsprozesse mit der in Form von Photonen erzeugten Energie ermöglichen das Leben auf der Erde – die Sonne strahlt seit 4,6 Milliarden Jahren und wird noch weitere Milliarden Jahre leuchten. Die Botschaft ist eindeutig: Kernfusion ist physikalisch machbar und stabil. Ist sie auch auf der Erde machbar ?

2.3 Ist die Kernfusion auf der Erde wissenschaftlich, technisch und ökonomisch als Quelle für die Stromerzeugung lösbar ?

Kernfusion auf der Erde: Andere Bedingungen, neue Konzepte

Auf der Erde können wir nicht auf die Schwerkraft der Sonne zählen. Deshalb müssen wir durch Konstruktion erreichen, was die Sonne durch ihre Masse erreicht:

Höhere Temperatur statt Gravitationsdruck:

Auf der Erde notwendig:

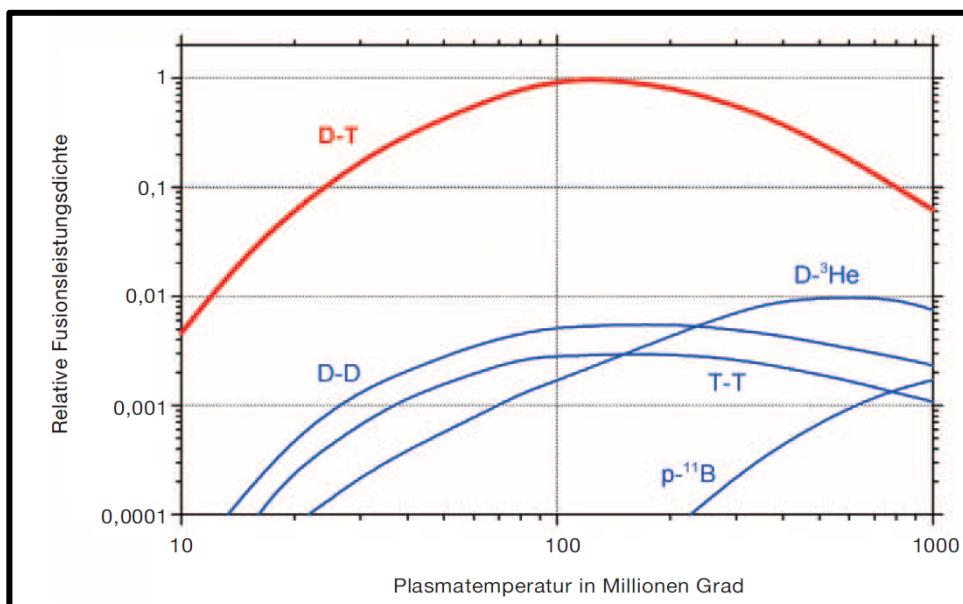
- **100 Millionen Grad Celsius**, Sonne: 15 Mio. Grad Celsius, das ist das 6–7-fache der auf der Sonne vorherrschenden Temperatur. Diese hohe Temperatur ist aber auf der Erde durch externe Heizung erreichbar.
- **Spezifische Wasserstoff-Kerne** zur Überwindung der abstoßenden Kräfte (Coulomb Barriere)

Siehe dazu **Exkurse 2 und 3**.

Exkurs 2: spezifische Brennstoffe für die Realisierung der Kernfusion

Zusätzlich zu den 6–7-fach höheren Temperaturen liefert die irdische D-T-Fusion (Deuterium/Tritium; Abb. 3) einen Isotopenmix mit deutlich höherer Reaktivität als die Proton-Proton-Reaktionen der Sonne. Erst unter diesen Bedingungen können die Reaktionspartner verschmelzen.

Abb.3: Relative Fusionsleistungsdichte von Kernfusionsreaktionen mit unterschiedlichen Brennstoffen in Abhängigkeit von der aufzubringenden Temperatur, siehe [5]



Quelle links: angepasst an Haefner et al. 2023, Quelle rechts: Meschini et al. 2023

Erläuterung: D = Deuterium, T = Tritium, B = Bor, He = Helium

Der Brennstoff für die Kernfusion, hauptsächlich die Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium, sind in der Natur reichlich vorhanden und gelten als nahezu unbegrenzt verfügbar. Dies verleiht der Technologie ein großes Potenzial als eine zukünftige, nachhaltige Energiequelle. Deuterium kann aus Wasser gewonnen werden und Tritium lässt sich aus Lithium im Kernfusions-Reaktor selbst gewinnen. Lithium ist ein Element, dessen Vorkommen hinreichend ist, um eine langlebige Energiequelle zu ermöglichen, **siehe Exkurs 1.**

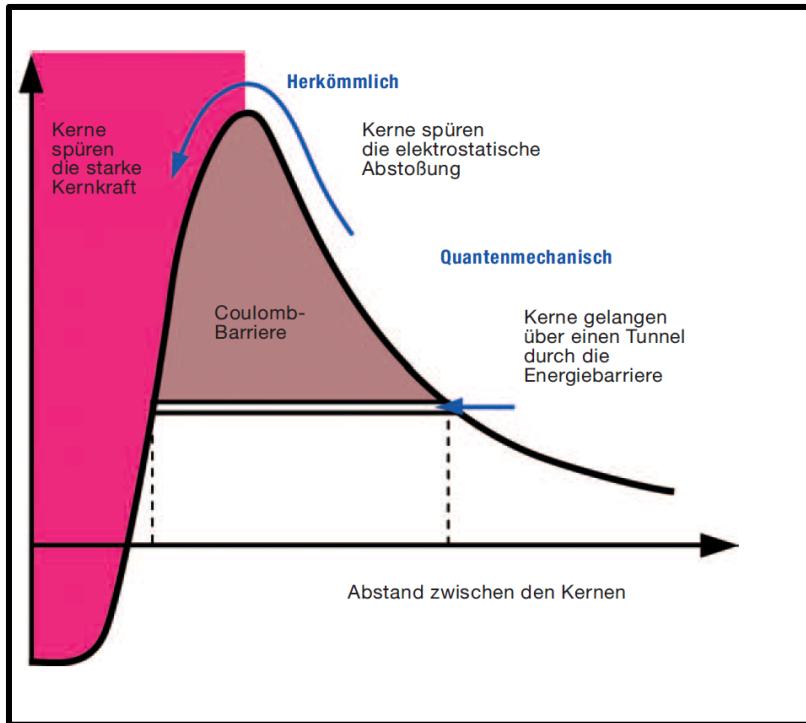
Deuterium ist ausreichend vorhanden, nicht jedoch Tritium. Die weltweiten zivilen Tritium-Reserven werden auf lediglich 30 bis 40 Kilogramm geschätzt, was deutlich unter dem jährlichen Tritiumbedarf eines Fusionskraftwerks mit einer Leistung von 1 Gigawattstunde (thermisch) von rund 56 Kilogramm liegen würde. Um die benötigte Menge an Tritium bereitzustellen, soll Tritium bei der Kernfusion „erbrütet werden“, indem im Blanket (die Wand, in der die Neutronen abgebremst werden) durch die Plasma freigesetzte Neutronen mit Lithium6 reagieren.

Eine weitere Kernfusionsreaktion passiert mit Wasserstoff/Bor, auch Proton-Bor-Reaktion. Dafür wird wegen der höheren Nukleonenzahl eine deutlich höhere Temperatur für die Zündung benötigt (etwa 30 x höher als für die Brennstoffe (Deuterium(Tritium))). Der Vorteil ist jedoch eine deutliche Reduzierung oder der Wegfall von radioaktiven Abfällen und deren Risiken.

Exkurs 3: Coulomb Barriere und Zündung

Die hohe Temperatur von > 100 Mio. Grad gibt den als Plasma vorliegenden positiv geladenen Kernen ($D-T$) die nötige Geschwindigkeit, um die abstoßende elektrostatische Kraft (Coulomb Kraft) zu überwinden, siehe Abb. 4. Dabei kommt der quantenmechanische Tunneleffekt zu Hilfe, welcher es ermöglicht, dass bereits bei einer wesentlich niedrigeren Energie als die der „Coulomb-Barriere“ die Coulomb Kraft überwunden werden kann [6],

Abb. 4 Die Quantenphysik macht mit dem Tunneleffekt und den überaus starken Kernbindungskräften die Kernfusion erst möglich [6],



Quelle: Forschungszentrum Jülich

Nach der Überwindung der „Coulomb-Barriere“ kommen sich die Kerne so nahe, dass die Kraft der starken Wechselwirkung dominiert. Dabei entstehen die Fusionsprodukte Helium und Neutronen, welche eine so hohe kinetische Energie aufweisen, dass (siehe Abb. 5)

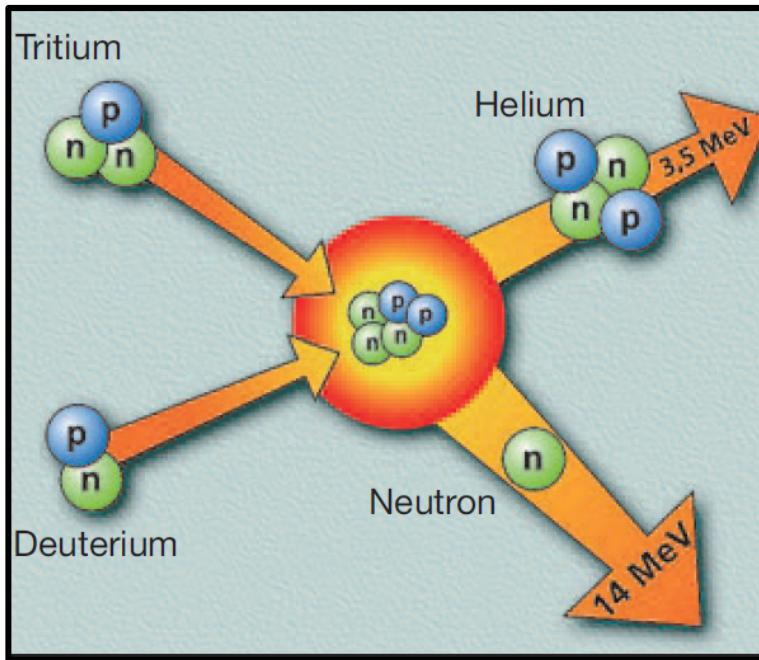
(a) das Helium weitere Fusionsreaktionen anstoßen kann und damit die Fusionsreaktion aufrechterhält sowie (b) das Neutron als nicht-geladenes Teilchen den „Magnetkäfig“ - der Raum, in dem die geladenen Ionen durch Magnetkräfte eingesperrt sind - verlässt und seine kinetische Energie an die Reaktorwände abgibt und diese erwärmt.

Aus dieser Wärme wird wie im konventionellen Kraftwerk Strom erzeugt. Das Neutron überträgt die bei der Fusion erzeugte Energie auf die Reaktorwände, wo durch einen Sekundärkreislauf Wasserdampf/Strom erzeugt wird.

Das Helium bekommt 20 % der Fusions-Energie, womit es das Plasma nachheizt. Die Energie in den Fusionsteilchen besitzt eine hohe Bewegungsenergie, die einerseits zur Aufheizung der

Fusionsmaterie (He) und andererseits zur elektrischen Energieproduktion im Kraftwerk (n) genutzt werden kann [6].

Abb. 5. Aus Deuterium und Tritium entstehen Helium und ein energiereiches Neutron n [6].



Quelle: Forschungszentrum Jülich

Die erforderlichen > 100 Mio. Grad werden z. B. durch von außen zugeführte Heizenergie erzeugt. Erst bei Erreichen dieser Temperatur zündet das Plasma. Zünden heißt: die Fusion kommt in Gang und verläuft unter bestimmten Bedingungen selbstständig ohne weitere von außen zugeführte Energie. Damit das hinreichend passiert, muss das Produkt aus der Einschlusszeit des Plasmas, der Teilchendichte im Plasma und der Temperatur im Plasma (Tripelprodukt) einen bestimmten Schwellenwert überschreiten (Lawson-Kriterium, siehe **Exkurs 4**).

Die Dichte (bzw. der Druck) kann beim Magneteinschluss nicht beliebig erhöht werden, da ab einem bestimmten Schwellenwert verstärkt Plasmainstabilität auftritt. Damit die Ausbeute aus der selbstständigen Fusion ergiebig genug ist, versucht man, das gezündete Plasma möglichst lange zu erhalten (Einschlusszeit). Die Einschlusszeit hängt wiederum davon ab, dass der „Magnetkäfig“ geschlossen ist damit die Instabilitäten gering sind.

Von einem regulären Kraftwerksbetrieb ist die Kernfusion noch weit entfernt: Für keines der Fusionskonzepte existiert ein Kraftwerksprototyp. Es muss noch gezeigt werden, dass eine solche Anlage nicht nur im Prototyp-Maßstab technisch möglich ist, sondern auch ein wirtschaftlich tragfähiger Stromlieferant werden kann. Die Herausforderungen bis zu einer Realisierung sind groß und zahlreich. Viele Fachleute rechnen mit einem ersten Kraftwerksprototypen beziehungsweise kommerziellen Kraftwerken erst in 20 bis 25 Jahren.

Mit der Realisierung des wissenschaftlichen break-even ist man noch nicht am Ziel. Ein entscheidender Faktor, neben der Erreichung des **Lawson Kriterium (Exkurs 4)**, ist der **Q-Faktor (Exkurs 5)**. Dieser ist auch ein wichtiger Indikator dafür, wie weit man vom wirtschaftlichen break-even entfernt ist.

Exkurs 4: Lawson Kriterium

Das Lawson-Kriterium ist eine physikalische Bedingung dafür, dass eine in einem Plasma ablaufende Kernfusionsreaktion sich selbst trägt, d. h. sich in einer makroskopischen Brennstoffmenge selbsttätig aufrechterhält. Damit sich diese Bedingung einstellt, muss das Produkt aus der Einschluszeit des Plasmas, der Teilchendichte im Plasma und der Temperatur im Plasma (sog. Tripelprodukt) einen bestimmten Schwellenwert überschreiten: das Lawson-Kriterium. Dadurch kommt es zu einem weiteren Anstieg der Fusionseignisse.

Das Lawson Kriterium beschreibt das Produkt aus Plasmadichte n , Temperatur T und Energieeinschluszeit τ , häufig auch als „Triple Product“ bezeichnet.

Wird ein bestimmter Schwellenwert dieses Triple Products überschritten, erzeugt das Plasma netto mehr Fusionsleistung, als zur Beheizung des Plasmas aufgebracht werden muss. Diesen Zustand bezeichnet man als Scientific Breakeven ($Q = 1$), bei dem die durch Fusion im Plasma freigesetzte Energie der zugeführten Heizenergie entspricht.

*Für die **Zündung** stellt die Plasmaheizung (im Falle des Magneteinschlusses) eine Heizleistung von kurzzeitig rund 50 bis 100 Megawatt (ITER) an Energie bereit. Wenn dann genügend Atomkerne miteinander fusionieren, entsteht so viel Wärme, dass das Plasma sich selbst erhält und die Heizsysteme abgeschaltet werden können. Die Fusionsprodukte Helium/Neutron setzen dann genug Energie frei, um das Plasma zu heizen, ohne dass externe Heizung notwendig ist. In diesem Fall zündet das Plasma, und „brennt“ dann ohne Energiezufuhr weiter und liefert seinerseits dauerhaft Energie als kinetische Neutronenenergie.*

Exkurs 5: Q-Faktor, Q-Faktor: Das wirtschaftliche Kriterium

Der Q-Faktor misst, wieviel nutzbare Energie aus der Reaktion herauskommen kann.

Ein Fusionskraftwerk (angenommene Leistung 1-2 GW), muss folgende Herausforderungen bestehen.

allgemein

Parameter	Status
<i>Scientific Break Even</i>	<i>erreicht (NIF Q > 4)</i>
<i>Economic Break Even</i>	<i>noch zu demonstrieren</i>
<i>Kommerzieller Kraftwerks-Prototyp</i>	<i>Frühestens 2040-2045</i>
<i>Netzkompatibilität & Dauerbetrieb</i>	<i>noch zu beweisen</i>
<i>Material-Langzeitverhalten</i>	<i>noch zu beweisen</i>

speziell

Parameter	Anforderung	Status
<i>Q-Faktor</i>	<i>> 10-15</i>	<i>Scientific break-even erreicht, economic break-even noch offen</i>
<i>Tritium-Breeding</i>	<i>selbstversorgend (>1,0)</i>	<i>ITER wird dies testen, noch nicht operational</i>

Materiallebensdauer	Reaktorwand > 30 Jahre	Neutronenschädigung größte Unsicherheit
Netzkompatibilität	sichere Frequenzregelung	Anforderung für Grundlastkraftwerk
Dauerbetrieb	> 90 % Verfügbarkeit	Tokamak: gepulst; Stellerator: kontinuierlich - Herausforderung
LCOE	< 50-75 Euro pro MWh	Abhängig von Design- und Lernkurveneffekten

Warum sind solch hohe Q-Werte nötig ?:

- Wirkungsgradverlust bei Stromumwandlung: ca. 40–50 %
- Magnetfeld-Kühlverluste: ca. 30–40 %
- Systeminfrastruktur, Betrieb, Wartung: zusätzliche Kosten

Ein $Q = 10$ würde bedeuten, dass 100 MW Fusionsenergie nach allen Verlusten noch wirtschaftlich verwertbar sind. Beim ITER geht man von einem Q-Faktor von mindestens 10 aus.

Aktueller Stand (2025):

- **Magneteinschluss:** $Q \approx 1$ nahezu erreicht (JET-Rekord)
- **Trägheitsfusion (NIF):** $Q = 4$ bereits überschritten (April 2025)

Ein Fusionsreaktor produziert erst dann fortlaufend Energie, wenn die Fusionsenergie ein Vielfaches der Leistung beträgt, die für Plasmaheizung aufgewendet werden muss. Dies wird mit dem **Q-Faktor** beschrieben: $Q = \text{produzierte Fusionsleistung}/\text{Plasmaheizung}$. Im Falle, dass der **Q-Faktor 1 ist**, spricht man von einem **scientific break-even**.

Mittlerweile wurde bei DT-Betrieb $Q=1$ für magnetischen Einschluss nahezu erreicht. Mit der Methode der Trägheitsfusion wurde beim Projekt NIF (national ignition facility) der Q-Faktor von 1 bereits überschritten, siehe **Kapitel 5**.

Die Kernfusion ist keine ferne Vision mehr, sondern ein technologiepolitisches Entwicklungsfeld mit konkreten Zeitplänen. Physikalisch sind die Grundprinzipien verstanden, technologisch rücken die

ersten Demonstrationsanlagen in Reichweite. Mit jedem Schritt in Richtung der Break-even-Ziele wächst die Wahrscheinlichkeit, dass Fusionskraftwerke im kommenden Jahrzehnt aus dem Labor in den Markt übergehen. Damit werden sie zu einem Schlüsselthema der künftigen Energiepolitik – nicht nur wegen ihres Potenzials, sondern auch, weil sie die Vorstellung von Energiesicherheit neu definieren: unabhängig, sauber, skalierbar. **Kapitel 3** wird diese technologischen Ansätze im Detail vorstellen und den Stand der wichtigsten Forschungs- und Demonstrationsprogramme weltweit beleuchten.

2.1 Ist die Kernfusion auf der Erde wissenschaftlich, technisch und wirtschaftlich machbar ?

Die ehrliche Antwort

Wissenschaftlich: Ja. Der Q-Faktor von 1 ist nahezu erreicht (bei NIF bereits $Q > 1$). Die Physik funktioniert.

Technisch: Weitgehend ja, aber mit Herausforderungen. Plasmastabilität, Materialbeständigkeit gegen Neutronenbeschuss, Tritium-Brütung, Wärme Einkopplung – all das muss demonstriert werden. Mehrere Forschungsreaktoren (z. B. ITER) arbeiten daran.

Wirtschaftlich: Unklar. Das ist die offene Frage. Wir müssen erst wirtschaftliche Demonstratoren bauen und testen. Die ersten Kalkulationen deuten auf Stromgestehungskosten ähnlich moderner Grundlastkraftwerke hin – aber Gewissheit gibt es erst nach Inbetriebnahme.

Zeithorizont realistisch

Nach Einschätzung der deutschen Akademien (Leopoldina, Acatech, 2024):

- **Frühestens 2045:** Erstes kommerzielles Fusionskraftwerk möglich
- **2045–2050:** Kleine Serie industrieller Demonstratoren erwartet
- **Nach 2050:** Relevanter Beitrag zur globalen Stromversorgung

Fazit für die Dekarbonisierung 2040–2045: Kernfusion wird voraussichtlich NICHT kurzfristig helfen. Sie ist ein Baustein für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts.

Trotzdem: Der Forschungsaufwand lohnt sich, denn ein funktionierendes Fusionskraftwerk wäre eine Energiequelle von ungeheurer Bedeutung für die Nachkommen. Und die technischen Fortschritte der letzten Jahre zeigen: Es ist nicht mehr unmöglich – es ist ein technisches Engineering-Problem, kein physikalisches Hindernis.

Fazit Kapitel 2

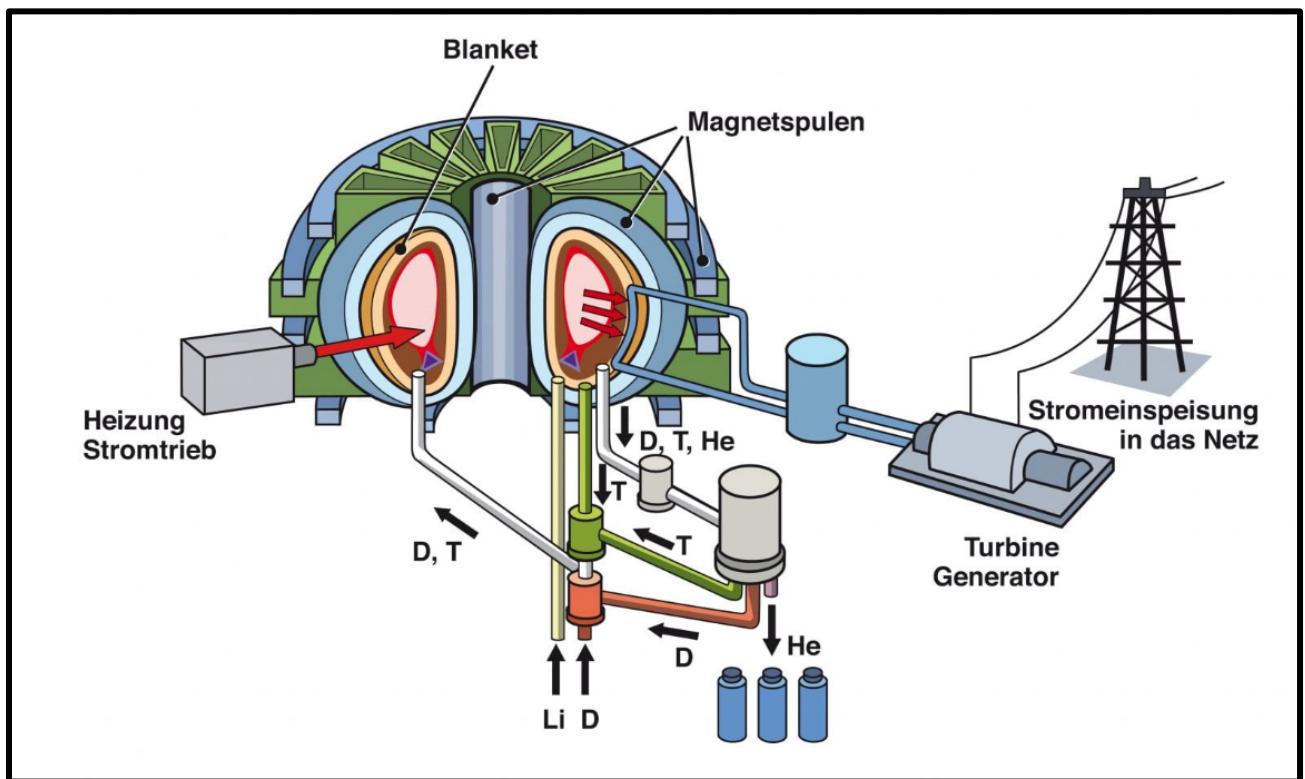
Kernfusion ist physikalisch bewiesen, technisch im Demonstrations-stadium und wirtschaftlich noch offen. Die Sonne zeigt, dass es geht; auf der Erde müssen wir es durch 100-Million-Grad-Hitze, Magnetfelder (oder Laser) und präzise Kontrolle erreichen. Die kritischen Parameter – Lawson-Kriterium und Q-Faktor – sind die Messstäbe für Fortschritt und Erfolg . Mit den jüngsten Errungenschaften ist ein erstes Fusionskraftwerk nicht mehr Fantasie, sondern ein ambitioniertes, erreichbares Ziel der nächsten zwei Jahrzehnte.

3. Realisierungskonzepte: Die wichtigsten Methoden zur Erzeugung von Energie aus Kernfusion (allgemein)

Um die Kernfusion für die Energiegewinnung einsetzen zu können, konzentriert sich die Forschung hauptsächlich auf zwei grundlegende Technologiekonzepte: die Magnet- und die Trägheitsfusion. Zu Letzterer zählt vor allem die Laserfusion. Bei beiden Konzepten können grundsätzlich die gleichen Brennstoffe zur Anwendung kommen.

Es wird sich bei der praktischen Realisierung jeweils um thermische Kraftwerke handeln (Abb. 6). Während der Kernfusionsreaktion werden Neutronen freigesetzt, die dann von der Innenwand des Reaktorgefäßes abgebremst und eingefangen werden. Ihre Bewegungsenergie wird in Wärme umgewandelt. Diese wird an einen Wärmetauscher beziehungsweise Wärmekreislauf abgegeben, aus dem heraus dann Wasserdampf erzeugt wird, welcher Turbinen zur Stromerzeugung durch Generatoren nutzt.

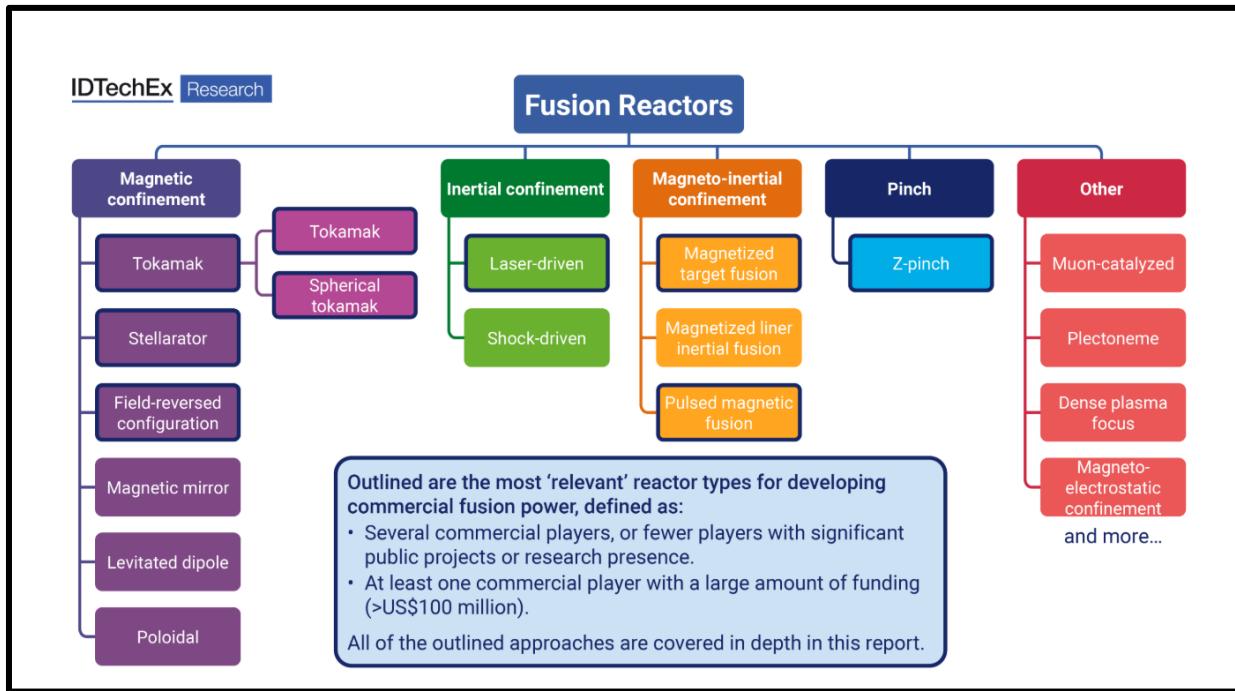
Abb. 6: Stromerzeugung mit einem Fusionskraftwerk[7],



Quelle: MPI CC BY-NC-ND 4.0

Die verschiedenen Ansätze zur kommerziellen Fusion können nach dem Strukturschema wie in Abb. 7 kategorisiert werden.

Abb. 7: Kategorisierung der verschiedenen technischen Optionen zur Realisierung der Kernenergie [8].



IDTechEx reaearch

3.1 Magneteinschluss

3.1.1 Magneteinschluss, Projekte

Bei der **Magneteinschlussfusion** (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 das Plasma für einige Sekunden auf über 100 Millionen Grad Celsius, damit das Brennstoff-Gemisch zünden kann.

Für die Zündung stellt die Heizung dafür kurzzeitig rund 50 bis 100 (Iter) Megawatt an Energie bereit. Wenn dann genügend Atomkerne (D, T) miteinander fusionieren, entsteht so viel Wärme, dass das Plasma sich selbst erhält und die Heizsysteme abgeschaltet werden können (**Exkurs 4**).

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 beschädigen. Dieses gilt es zu verhindern. Die beiden vielversprechendsten Reaktortypen bei der Magnetfusion sind der **Tokamak** und der **Stellarator (Exkurs 6)**.

Exkurs 6 : Die Reaktortypen der Magnetfusion: Tokamak und Stellarator

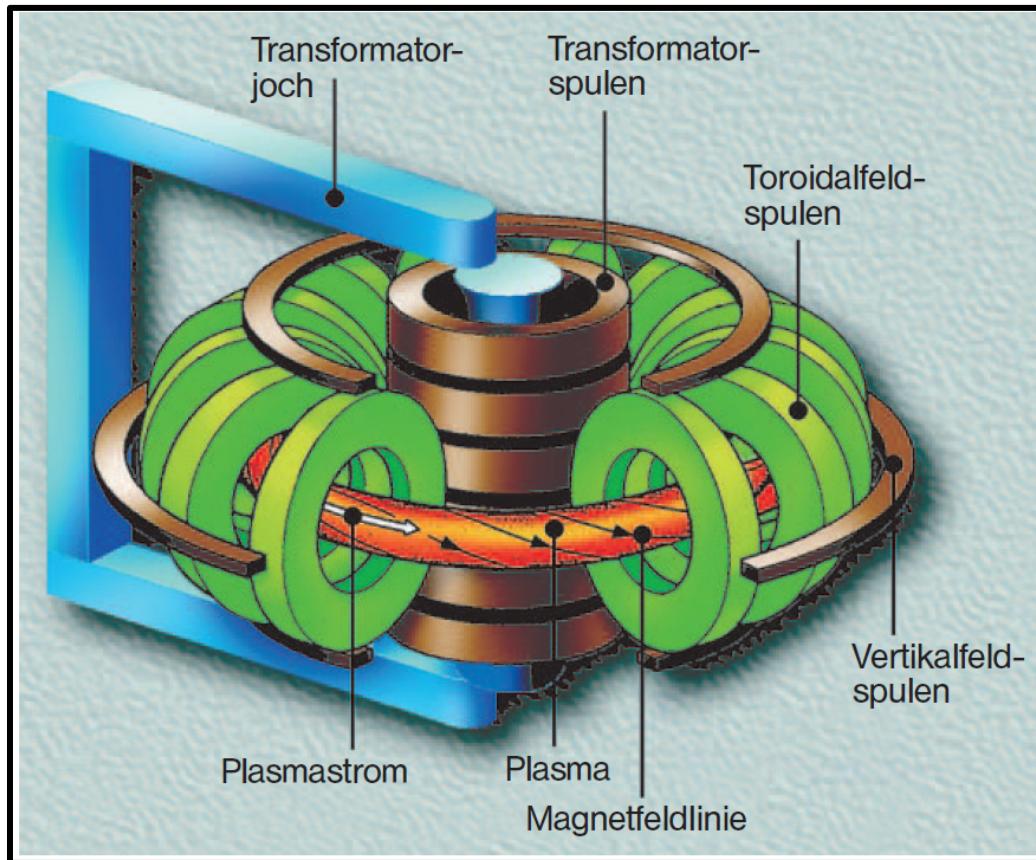
*Bei der **Magnetfusion** wird Deuterium und Tritium auf über 100 Millionen Grad Celsius erhitzt, sodass ein Plasma entsteht. Wenn dieses Plasma auf die Gefäßwand treffen würde, würde es sich sofort abkühlen. Mithilfe von Magnetfeldern kann das Plasma jedoch im Gefäß eingeschlossen werden, da die vorliegenden geladenen Teilchen den Magnetfeldlinien auf Schraubenbahnen folgen. Dadurch reduziert sich der Kontakt mit der Reaktorwand. Im Plasma können dann – ähnlich wie in der Sonne – Fusionsreaktionen stattfinden. Die Magnetfusion ist zurzeit der Ansatz, der am weitesten erforscht ist.*

Der Plasmastrom wird normalerweise durch eine Transformatorschleife induziert. Daher arbeitet ein Tokamak nicht kontinuierlich, sondern gepulst: In einem Transformator kann nur für eine beschränkte Zeit ein ansteigender Strom in der Primärwicklung erzeugt und damit ein Strom im Plasma erzeugt werden. Danach muss der Transformator "entladen" und der Strom von neuem hochgefahren werden.

*Ein **Tokamak** benötigt zum Aufbau des Magnetkäfigs drei sich überlagernde Magnetfelder: erstens ein ringförmiges Feld (Toroidalfeld), das durch ebene äußere Spulen erzeugt wird, und zweitens das Feld eines im Plasma fließenden Stroms. Es wird durch die Transformatorschleife im Zentrum der Anlage erzeugt (Central Solenoid). In dem kombinierten Feld laufen die Feldlinien dann schraubenförmig um. So wird die zum Einschluss des Plasmas nötige Verdrillung der Feldlinien und der Aufbau magnetischer Flächen erreicht. Ein drittes, vertikales Feld (Toroidalfeld) – erzeugt durch die*

Vertikalfeldspulen – fixiert die Lage des Stromes im Plasma. Siehe Abb. 8.

Abb. 8. Aus Deuterium und Tritium entstehen Helium und ein energiereiches Neutron n [6].



Quelle:

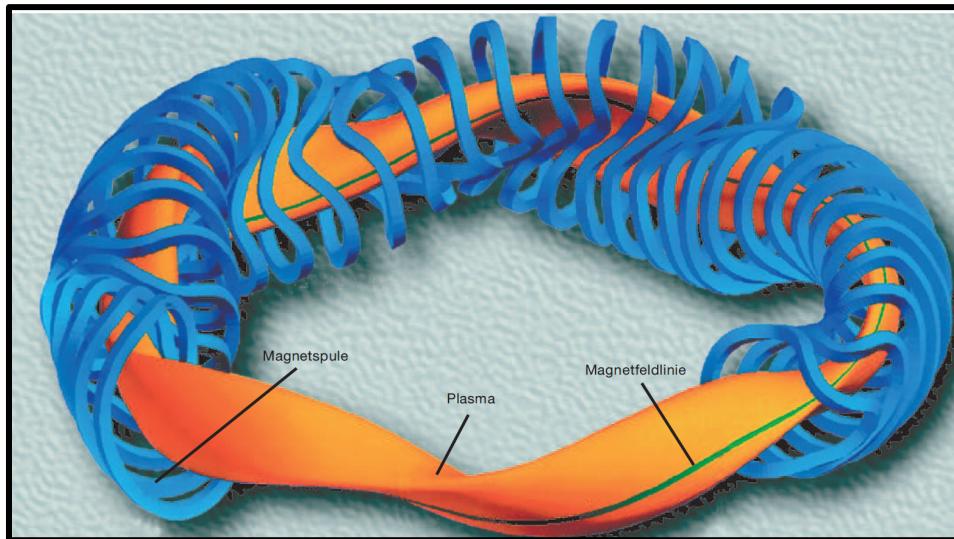
Forschungszentrum Jülich

Der Plasmastrom wird normalerweise durch eine Transformatorspule induziert. Schwer zu beherrschen sind Plasmainstabilitäten, bei denen das heiße Plasma in einem Tokamak-Fusionsreaktor unkontrollierbar wird und zu einem schnellen Verlust der thermischen Energie oder einer vollständigen Beendigung der Entladung führt. Diese Instabilitäten entstehen durch die Wechselwirkung des Plasmas mit seinen eigenen Magnetfeldern und stellen eine große Herausforderung für die Kernfusion dar, da sie die stabile Aufrechterhaltung des Plasmabrennens erschwert.

*Das wichtigste Projekt auf Basis Tokamak ist das internationale Projekt ITER, siehe auch **Exkurs 7**.*

Stellaratoren sind prinzipiell stabiler als Tokamaks, da sie ihre Magnetfelder von außen erzeugen und nicht auf einen Plasma-Strom angewiesen sind, der zu Instabilitäten führen kann. Stellaratoren ermöglichen eine zuverlässigeren und kontinuierlichere Arbeitsweise. Ein Stellarator kommt also ohne Strom im Plasma und damit auch ohne Transformator aus. Das Magnetfeld wird durch sehr speziell angeordnete externe supraleitende Magnetspulen erzeugt (Abb. 9), die eine Transformatorspule unnötig machen. Außerdem fallen die Anforderungen an die Plasmakontrolle etwas geringer aus. Die dafür notwendige Spulenanordnung ist allerdings so komplex, dass sie erst durch Simulationen mit Großrechnern realisiert werden konnte.

Abb. 9: Das Stellarator-Prinzip: einschließendes schraubenförmiges Magnetfeld ohne Plasmastrom [6].



Quelle: Institut für Plasmaphysik

Zusammenfassung der wichtigsten Vergleichsmerkmale: Tokamak vs. Stellarator

Aspekt	Tokamak	Stellarator
Magnetfeld	<i>Ringspulen + induzierter Plasmastrom</i>	<i>durch externe komplexe Spulen</i>
Betriebsmodus	<i>Gepulst (Zyklus: Sekunden bis Minuten)</i>	<i>Kontinuierlich (Stunden bis Tage)</i>
Stabilität	<i>Instabil ohne ständige Regelung</i>	<i>Stabil durch Design</i>

Komplexität Aufbau	Relativ einfach	Sehr komplex
--------------------	-----------------	--------------

Exkurs 7: Projekte auf Basis Magneteinschluss

Die meisten Projekte sind **Tokamak** Forschungsanlagen. Die Tokamak-Technik wird an Projekten wie z. B. JET, ITER, ASDEX, aber auch Anlagen in China (EAST) und Japan (JT-60SA) vorangetrieben. Die Weiterentwicklungen, z. B. zur Stabilisierung des Plasmas, sollen für den Einsatz beim Projekt ITER/DEMO genutzt werden.

Mit **ITER** (International Thermonuclear Experimental Reactor) soll letztendlich der Beweis für das technische und wirtschaftliche Funktionieren der Kernfusion erbracht werden. ITER ist das größte Tokamak-Projekt, welches derzeit im südfranzösischen Cadarache errichtet wird. An dem internationalen Projekt sind die Länder China, die Europäische Atomgemeinschaft (Euratom), Indien, Japan, Südkorea, Russland und die USA beteiligt. Es ist in der internationalen Forschungslandschaft das Schlüssel-Projekt. Es zielt darauf ab, den Beweis für das technische und wirtschaftliche Funktionieren der Kernfusion zu erbringen (siehe Abb. 10). Darin wird in einer Donut-förmigen Vorrichtung mit Hilfe eines magnetischen Einschlusses ein extrem heißes Plasma erzeugt und kontrolliert, in dem Fusionsreaktionen stattfinden können, ähnlich wie im Energieprozess der Sonne. Es soll darin ein „brennendes“ Plasma erzeugt werden, das sich durch seine eigene Wärme selbst aufrechterhält und 500 MW Fusionsenergie produzieren soll.

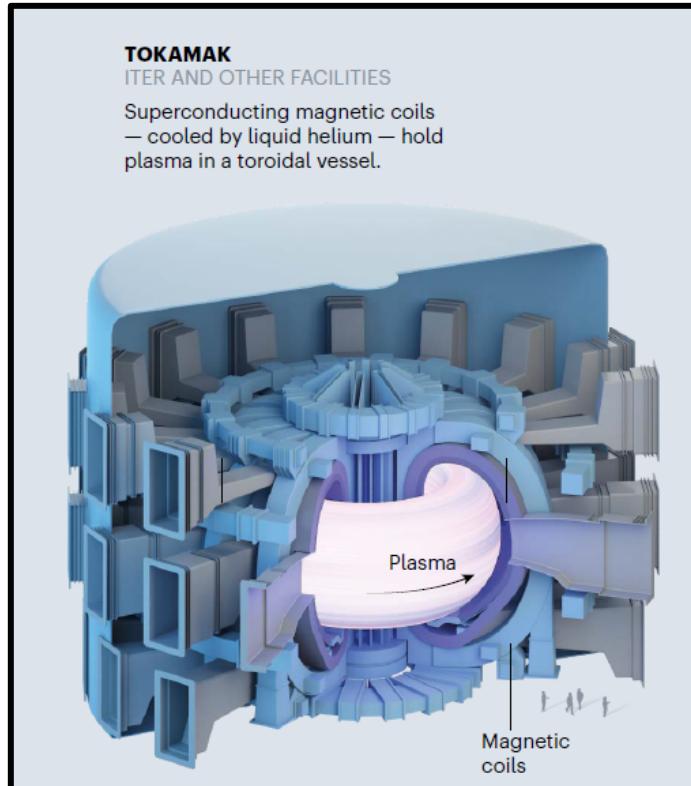
Mit ITER ist in der 1. Stufe noch nicht für eine **positive Energiebilanz** also Q-Faktor 10 ausgelegt. Für eine positive Energiebilanz ist die Anlage zu klein. Den Schritt zu einer positiven Energiebilanz soll der nachfolgende Demonstrator **DEMO** erreichen. Beim **ITER/DEMO** Projekt sollen über längere Zeit etwa zehnfach höhere Fusionsleistungen als beim **JET**-Projekt in Großbritannien erreicht werden. Das Erreichen eines Q-Wertes von 10 würde zeigen, dass die Kernfusion potenziell als Energiequelle nutzbar ist. ITER dient zur Vorbereitung der **ITER/DEMO**-Experimente. **ITER/DEMO** soll Strom erzeugen und ins Netz einspeisen, die Zuverlässigkeit demonstrieren

und einen geschlossenen Brennstoffkreislauf etablieren (also auch selbst Tritium produzieren).

DEMO ist als Nachfolgeprojekt von **ITER** geplant. Zwischen 300 und 500 Megawatt Netto-Strom für das Netz zu erzeugen und mit einem geschlossenen Brennstoffkreislauf arbeiten. Das bedeutet, dass verbrauchte Tritiumbrennstoffe wiederaufbereitet werden. Zudem sollen mit **ITER/DEMO** wesentliche technologische Komponenten und Verfahren für den Betrieb eines Fusionskraftwerks entwickelt und demonstriert werden. Deutschland ist maßgeblich an **ITER** beteiligt und liefert mit seiner Expertise wichtige Beiträge zu dessen Realisierung, unter anderem zur Energieauskopplung (Plasma-Wand-Wechselwirkung). **DEMO** soll zu einem robusten Konzept für die wirtschaftliche Nutzung führen.

Die Kosten für **ITER**, das bisher größte und teuerste Fusionsprojekt, belaufen sich nach derzeitigen Schätzungen auf rund 18 - 22 Milliarden Euro. Weitere 5 Mrd. EURO sind bis zur Realisierung veranschlagt.

Abb. 10: Tokamak mit supraleitenden Spulen [10], **ITER** und andere.



Quelle: Nature | Vol 599 | 18 November 2021

JET in Großbritannien ist der aktuell weltweit größte Tokamak in Betrieb. Er dient als Testumgebung für zahlreiche Technologien und Szenarien für ITER Anwendungen. Der Joint European Torus (JET) war ein Experiment zur Plasmaphysik mit magnetischer Einschließung, das im Culham Centre for Fusion Energy in Großbritannien, durchgeführt wurde. Die auf einem Tokamak-Design basierende Fusionsforschungsanlage war ein gemeinsames europäisches Projekt mit dem Hauptziel, den Weg für die zukünftige Energieversorgung aus Kernfusion zu ebnen. Zum Zeitpunkt seiner Konstruktion war JET größer als jede andere vergleichbare Anlage. Nach Jahrzehntelanger Forschung wurde JET Ende 2023 stillgelegt.

JET nahm 1983 den Betrieb auf und verbrachte den größten Teil des folgenden Jahrzehnts damit, seine Leistung in einer langen Reihe von Experimenten und Upgrades zu steigern. 1991 wurden die ersten Experimente mit Tritium durchgeführt, wodurch JET zum ersten Reaktor der Welt wurde, der mit einem Brennstoffgemisch aus 50 % Tritium und 50 % Deuterium betrieben wurde. Außerdem wurde beschlossen, JET mit einem Divertor auszustatten.

Ein Divertor ist eine Komponente in einem Fusionsreaktor, die Wärme und Teilchen vom Hauptplasma wegleitet, um die Reaktorwände zu schützen. In einem Fusionsreaktor entfernt er Fusionsprodukte (wie Helium) und Verunreinigungen, wobei er in der Regel Magnetfelder nutzt, um den äußeren Rand des Plasmas zu speziellen Platten zu leiten, wo die Partikel neutralisiert und gesammelt werden.

Die Leistung des JET wurde erheblich verbessert, und 1997 stellte JET den Rekord für die größte Annäherung an die wissenschaftliche Gewinnschwelle auf, indem es einen Wert von $Q = 0,67$ erreichte und 16 MW Fusionsenergie erzeugte, während 24 MW thermische Energie zur Erwärmung des Brennstoffs eingespeist wurden.

JT-60SA in Japan ist eine gemeinsame europäisch-japanische Fusionsforschungsanlage in Naka, Japan, und nach ITER der weltweit größte supraleitende Tokamak. Er soll das größere ITER-Projekt unterstützen, indem er die für zukünftige Fusionskraftwerke erforderliche Physik und Technologie untersucht, wobei der

Schwerpunkt auf der Erreichung eines stationären Betriebs mit hohem Plasmadruck und der Durchführung von Experimenten zur Entwicklung eines Reaktors vom Typ DEMO liegt.

Projekte auf Basis Magneteinschluss, Stellarator

Ebenso wie für Tokamak sind auch für den Stellarator verschiedene Projekte im Gange, die meisten als Start-up-Projekte. Es ist noch nicht entschieden, ob die Tokamak- oder die Stellarator-Technologie für die Nachfolgestufe DEMO des ITER zum Zuge kommt.

*Deutschland ist bei der Stellarator-Entwicklung führend, vor allem mit den staatlichen Projekten in Garching und Greifswald, aber auch bei den **Start-up Unternehmungen Gauss Fusion und Proxima Fusion**. In Garching wird derzeit nur ein Tokamak betrieben (ASDEX upgrade).*

Die Experimentieranlage Wendelstein 7-X im Teilinstitut des Instituts für Plasmaphysik in Greifswald soll die Kraftwerkstauglichkeit von Fusionsanlagen des Typs "Stellarator" demonstrieren. Wendelstein 7-X ist die weltweit größte Fusionsanlage vom Typ Stellarator.

Beim Stellarator werden die Nachteile des im Tokamak-Plasma fließenden Stromes vermieden: Mit bis zu 30 Minuten langen Plasmaentladungen soll Wendelstein 7-X die wesentliche Stellarator-Eigenschaft zeigen, den Dauerbetrieb.

Gauß Fusion: Die Gauß Fusion GmbH wurde 2022 mit Standorten in Deutschland gegründet und plant, im Laufe der Zeit in andere europäische Länder zu expandieren, mit dem Ziel, die fortschrittlichsten Entwicklungen im Bereich der Magnetfusion und anschließend die ersten Fusionskraftwerke im Netz zu betreiben. Gauß Fusion ist keine konkrete Anlage mit bekannten technischen Merkmalen, sondern eine Plattform oder ein Zusammenschluss, die die wissenschaftliche Forschung und industrielle Expertise bündelt, um Fusionskraftwerke zu entwickeln. Gründungsunternehmen und strategische Partner aus der Fusionsindustrie sind Alcen (Frankreich), ASG Superconductors (Italien), Bruker EAS (Deutschland), IDOM (Spanien) und RI Research Instruments (Deutschland). Technisch zielt Gauss Fusion darauf ab, zukünftige Kernfusions-Reaktoren

schneller zur Kommerzialisierung zu bringen: einfachere Assemblierung, verbesserte Wartung, skalierbare Produktion, Recycling, Abfalltrennung, etc.

Gauß Fusion hat viel Kompetenz *inhouse*. Die Gründungsunternehmen aus Deutschland, Frankreich, Italien und Spanien verfügen über eine umfangreiche Expertise in Fusionstechnologie. Zudem kooperiert Gauß Fusion mit renommierten Forschungsinstituten: dem internationalen Forschungsinstitut CERN in der Schweiz, dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) sowie dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in Deutschland und ENEA in Italien. Gauß Fusion betreibt die Kommerzialisierung und die industrielle Skalierung der Kernfusionsenergie, um bis 2045 das erste europäische Fusionskraftwerk auf Basis eines Stellarator-Ansatzes zu bauen und eine saubere, sichere und grundlastfähige Energieversorgung in Europa zu etablieren.

Gauß Fusion hat einen Conceptual Design Report (CDR) vorgestellt [9a]. Der Bericht behandelt alle wesentlichen Systeme: Architektur, Sicherheit, Lebenszyklusmanagement, Materialien, Qualifikationen, radioaktive Abfallentsorgung und den Einsatz bestehender Technologien. Die geschätzten Kosten für das erste kommerzielle GIGA-Kraftwerk liegen zwischen 15 und 18 Milliarden Euro und das Ziel ist es, den Bau mittelfristig, etwa Mitte der 2040er Jahre, zu realisieren. Dieses Projekt stellt einen Sprung dar, von der reinen Forschung zu konkreten industriellen und kommerziellen Konzepten. Allerdings handelt es sich bei GIGA noch um einen Konzeptentwurf und nicht um ein sofort umsetzbares Ingenieurprojekt; es braucht Zeit, um Komponenten zu validieren, den Bau zu finanzieren und alle erforderlichen Genehmigungen einzuholen.

CDR konkretisiert auch die Vision von Gauß Fusion von einem „Eurofighter für die Fusion“, einem paneuropäischen Programm, das industrielles Know-how, nationale Investitionen und Lieferkettenkapazitäten bündelt, um Energiesouveränität für Europa zu erreichen.

Proxima Fusion ist ein 2023 gegründetes Spin-out des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik (IPP) in München. Das Stellaris-Konzept (Kompaktheit, HTS (**Exkurs 8**)) ist das Ergebnis einer öffentlich-privaten Partnerschaft zwischen den Ingenieuren von Proxima Fusion und den Wissenschaftlern des IPP und baut auf dem erfolgreichen Wendelstein 7-X auf, dem QI-Forschungsstellarator des IPP auf. Ein QI-Stellarator ist eine spezielle Bauweise eines Stellarators, bei der das Magnetfeld so gestaltet wird, dass Teilchenverluste minimiert und das Plasma stabil eingeschlossen wird, wodurch der Betrieb im Vergleich zu anderen Stellarator-Typen effizienter wird.

Proxima Fusion und seine Partner haben mit Stellaris ein gesamtheitliches Konzept für ein kommerzielles Fusionskraftwerk entwickelt, das auf einen zuverlässigen, kontinuierlichen Dauerbetrieb ausgelegt ist. Herzstück des Konzepts ist ein magnet-dynamisch optimierter Stellarator mit Hochtemperatur-Supraleiter-Magnettechnologie (HTS), der als Hochfeld-Stellarator ausgelegt ist und deutlich stärkere Magnetfelder als frühere Stellarator-Konzepte erzeugen soll.

3.1.2 Magneteinschluss, alternative Projekte

Neben Tokamak und Stellarator gibt es mit dem Projekt **Commonwealth Fusion (CFS)** (Massachusetts) das Konzept SPARC ein alternatives Projekt, das im Prinzip auch auf Tokamak basiert. Es strebt einen viel kleineren Aufbau als der herkömmliche TOKAMAK an. Um darin das Plasma einzuschließen, sind viel stärkere Magnetfelder nötig. Herzstück von SPARC sind daher neuartige Magnetspulen aus Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) (**Exkurs 8**), die leistungsfähiger als die supraleitenden Spulen von ITER sind und weniger stark als z. B. die supraleitenden Magnete bei ITER gekühlt werden müssen. Im ITER-Projekt werden im Plasmazentrum Magnetfeldstärken von 6 – 13 Tesla erzeugt. Man erwartet, dass mit SPARC Magnetfeldstärken von bis zu 10 - 20 Tesla erreicht werden

können. SPARC ist ein Zwischenschritt zu ARC. ARC ist ein Fusionskraftwerkskonzept (ein Spin-Out des MIT), das auf einem konventionellen Tokamak-Design basiert und von CFS entwickelt wird. Ziel von ARC ist es, die wirtschaftliche Realisierbarkeit von Fusionsenergie mit HTS-Magnettechnologie (HTS = Hochtemperatursupraleitung) zu demonstrieren. ARC soll eine Leistung von 400 MW haben und dank der HTS-Technologie wesentlich kompakter sein als ITER. Die magnetischen Feldstärken von 10 bis 20 Tesla sollen die stärksten sein, die je realisiert wurden. HTR arbeiten im Bereich -250 °C, also ca. 20 °K. Die Realisierung von ARC ist für Anfang der 30-iger Jahre geplant, also deutlich früher als ITER.

ARC wird über HTS-basierte komplexe Magnetspulen zur Optimierung des magnetischen Einschlusses realisiert. Dadurch sollen auch Probleme mit der Lebensdauer der ersten Wand verringert und die Flexibilität der Vakuumtechnik und der Divertor-Materialien verbessert werden. Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) haben kürzlich mit Seltene Erden Barium-Kupferoxid (REBCO) die industrielle Reife erreicht: REBCO wird bereits unterhalb 200 Grad Celsius supraleitend, was etwa der Temperatur von flüssigem Stickstoff entspricht.

ARC wird von den Erkenntnissen und Erfahrungen des SPARC-Tokamaks profitieren, der sich derzeit in der Entwicklung befindet (Baubeginn war im Februar 2023). Der Bau soll 2025 abgeschlossen sein, die Inbetriebnahme soll 2026 erfolgen.

Commonwealth Fusion wird mit 2 Mrd. \$ Start-Up Kapital finanziert. Weitere Mittel in Höhe von 863 b\$ flossen im August 25.

Zu HTS siehe Exkurs 8: Hochtemperatur-Temperatur Supraleiter (HTS) für die Kernfusion

Exkurs 8: Hochtemperatur-Temperatur Supraleiter (HTS) für die Kernfusion [9]

HTS-Fusion ist die Verwendung von Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) zur Erzeugung der starken Magnetfelder, die erforderlich sind, um Plasma in einem Fusionsreaktor einzuschließen. Mit Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) können kompaktere und effizientere Fusionsanlagen realisiert werden, da sie stärkere Magnetfelder und höhere Betriebstemperaturen zulassen.

Die HTR arbeitet bei Temperaturen von ca. 20 Grad Kelvin. In den heutigen Tokamak/Stellarator Prototypen liegen die Feldstärken bei ca. 3 Tesla. Für zukünftige Stellaratoren werden 6 Tesla erwartet.

Mit HTS könnte nicht nur in erheblichem Umfang elektrische Leistung für den Betrieb der Kälteanlagen eingespart sondern auch der Kryostat für die Kraftwerksmagnete deutlich vereinfacht werden. Daher beschäftigt man sich an verschiedenen Stellen mit der Entwicklung von HTS:

China: das Projekt HH70 des chinesischen start-ups Energy singularity meldet "the World's First Full High-temperature Superconducting Tokamak Achieves First Plasma "! In Jintiang beschäftigt man sich mit HTS, es wurden Feldstärken von 21,7 Tesla erzielt.

Japan: Das Projekt Fast in Japan hat zum Ziel, bis 2030 einen Tokamak Reaktor mit HTS-Technik mit einer Leistung von bis zu 100 MW herzustellen.

USA: HTS ist eine Schlüsseltechnologie für Commonwealth Fusion Systems (CFS), die es dem Unternehmen ermöglicht, kleinere, leistungsstärkere und kostengünstigere Tokamak-Fusionsanlagen zu bauen. Eine Feldstärke von 20 Tesla wurde bereits erzielt. Ein Demo Reaktor soll bereits 2029 in Betrieb gehen.

Auch bei den deutschen Projekte **Gauss Fusion** und **Proxima** sollen die Potentiale von HTS untersucht werden.

UK: Auch innerhalb des britischen **Projektes STEP** soll die Eignung der HTS Technik untersucht werden.

Bei der Entwicklung von Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) für Fusionsanwendungen werden im Wesentlichen folgende Herausforderungen gesehen:

1. Instabilität und Quench-Verhalten bei hohen Strömen.
 2. Hohe Material- und Fertigungskosten der HTS-Leiter.
 3. Beherrschung der hohen mechanischen Kräfte infolge großer Magnetfeldstärken.
 4. Sicherstellung geeigneter elektrischer und mechanischer Eigenschaften von Leiterverbindungen (Joints).
 5. Hoher Neutronenfluss, der die kritischen Ströme und die Lebensdauer der Leiter reduzieren kann.
 6. Langzeitzuverlässigkeit und Strahlenschädigung von HTS-Materialien und Isolationswerkstoffen im Fusionsumfeld.
-

TAE Technologies, USA [9]. Konzept „Field reversed configuration“, siehe Abb. 12. Seit der Gründung von TAE Technologies verfolgt das Unternehmen die Fusion mit Wasserstoff-Bor. Wasserstoff und Bor sind weltweit unbegrenzt verfügbar. Allerdings erfordert die Erzeugung eines energieerzeugenden Fusionsplasmas mit einem Wasserstoff-Bor-Gemisch deutlich höhere Temperaturen.

Um die Leistungsfähigkeit des Fusionsplasmas zu steigern, entwickelte TAE Technologies eine eigene Plattform namens „Advanced Beam Driven Field Reverse Configuration“ (Abb. 11). Das Plasma rotiert um eine Achse. Diese Rotation erzeugt, ähnlich wie bei einem Kreisel, eine inhärente Stabilität.

Für den Einschluss sind keine starken externen Magnetfelder erforderlich; diese werden größtenteils durch das rotierende Plasma selbst erzeugt. Dieser Ansatz kombiniert tiefgreifende Erkenntnisse der Plasma- und Beschleunigerphysik, um das Plasma zu erhitzen und zu stabilisieren.

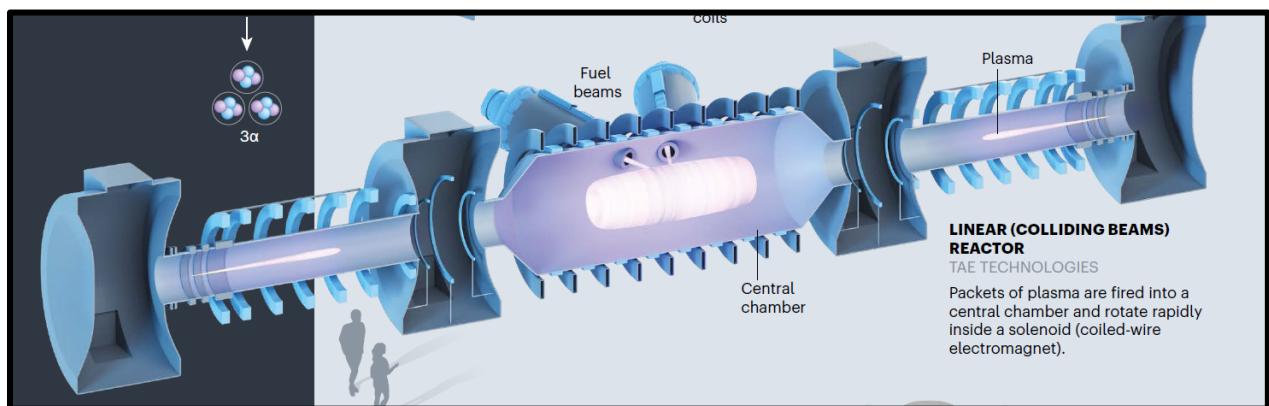
Darüber hinaus ermöglicht diese kompakte lineare Konfiguration ein kleineres und damit skalierbareres und kostengünstigeres Gerät.

TAE Technologies plant den weltweit ersten Prototyp einer Wasserstoff-Boron-Fusionsanlage für Anfang der 2030er Jahre. Der TAE-Vorteil: es gibt keine mit Tritium verbundenen Probleme. Es werden keine Neutronen erzeugt, die den Reaktor kontaminieren könnten.

Computersimulationen sollen zeigen, welche Energie erzeugt würde, wenn echter Fusionsbrennstoff verwendet würde. Zunächst sollen die Bedingungen der Fusion mit den Brennstoffen D-T erreicht werden.

TAE Technologies wird mit 1,3 Mrd. \$ Start-Up Kapital finanziert.

Abb. 11: Konzept des TAE Reaktors [9].



Quelle: Nature | Vol 599 | 18 November 2021

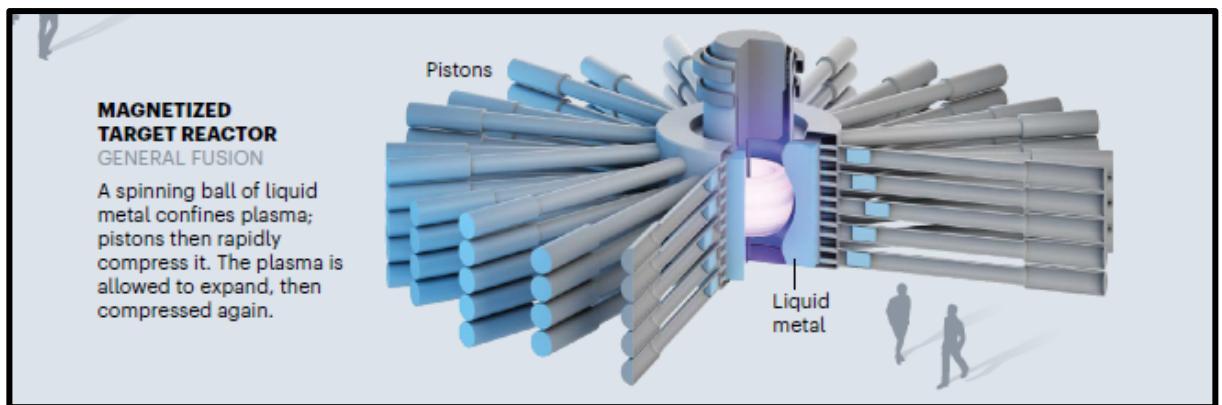
Das Start-Up **General Fusion** (GF) [9] in Culham in Grossbritannien verfolgt einen Ansatz des Einschlusses per Magnetfeldern und mechanischem Druck (Abb. 12), auch „Konzept spherical TOKAMAK“ genannt. Dabei wird das Plasma langsam komprimiert – beispielsweise mithilfe von Kolben –, unterstützt durch einen magnetischen Einschluss, was verhindert, dass Wärme beim Zusammendrücken des Plasmas entweicht. Diese Idee sucht nach einem optimalen Kompromiss zwischen den energieintensiven hohen Magnetfeldern, die zur Einschließung eines Tokamak-Plasmas erforderlich sind und den energieintensiven Schockwellen, Lasern oder anderen Methoden, die zur schnellen Kompression von Plasma in Trägheitsbeschränkungsdesigns verwendet werden.

GF nutzt eine Zentrifuge, um eine mit geschmolzenem Blei und Lithium gefüllte Kammer zu drehen. Diese Bewegung öffnet einen Hohlraum im

flüssigen Metall, in dem sich das Plasma befindet. Ein Kolbensystem pumpt mehr flüssiges Metall in die Kammer und komprimiert das Plasma über einige Dutzend Millisekunden. Sobald die Fusion beginnt wird der Druck abgelassen und der Vorgang wiederholt sich in Impulsen, etwa einmal pro Sekunde.

Ein besonders interessanter Aspekt dieses Reaktors ist die Art und Weise, wie Tritium-Brennstoff erzeugt wird. Bei ITER und anderen Konstruktionen wird Tritium durch den Brutvorgang mit Lithium erzeugt, wenn die schnellen Neutronen auf eine Lithiumdecke treffen, die den Tokamak auskleidet. Im Entwurf von GF wird Tritium erzeugt, wenn Neutronen auf Lithium innerhalb des Flüssigmetall-Kompressionssystems selbst treffen. GF hat erst in den letzten Jahren die größten Herausforderungen gemeistert: die Herstellung eines Plasmatargets, das lange genug hält, um komprimiert zu werden, und das reibungslose und schnelle Zusammenfallen des Plasmas.

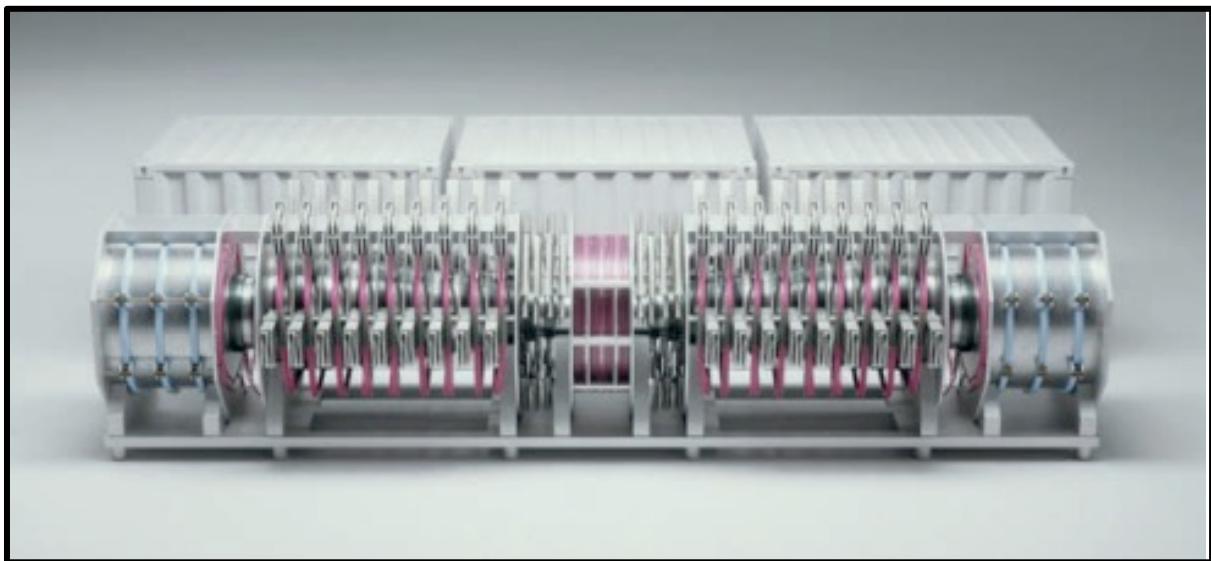
Abb. 12: General Fusion Reaktor [9].



Quelle: Nature | Vol 599 | 18 November 2021

Das private Fusionsunternehmen **Helion Energy in Everett, Washington**, hat großes Interesse bei Investoren geweckt (Abb. 13). Ziel ist es, Strom direkt aus der Fusion zu erzeugen, anstatt den Prozess zum Erhitzen von Flüssigkeiten (Dampf) und zum Antrieb von Turbinen zu nutzen. Die Helion Technik besteht darin, Plasmaimpulse in einem linearen Reaktor zu zünden und das verschmolzene Plasma anschließend mit Hilfe von Magnetfeldern [9].

Abb. 13: Der Reaktor von Helion Energy



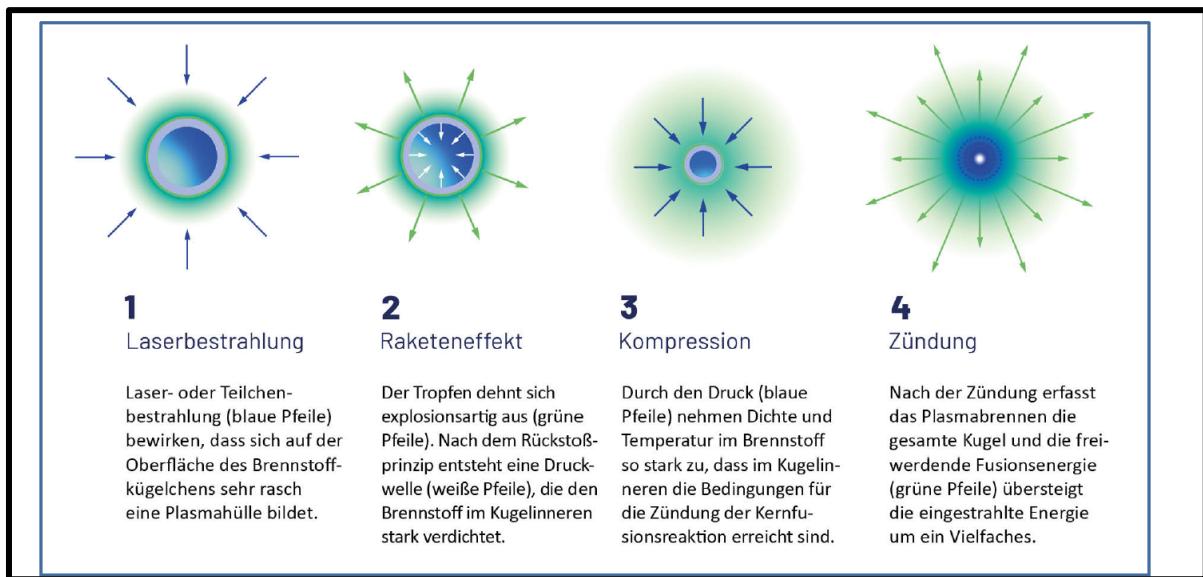
Quelle: Nature | Vol 599 | 18 November 2021

Das Helion Kernfusionsprinzip basiert auf einem gepulsten, linearen Ansatz: Zwei Plasmabälle (aus Deuterium und Helium-3) werden in einer Fusionskammer durch Magnetfelder beschleunigt, kollidieren, verschmelzen und erzeugen bei extrem hohen Temperaturen und Drücken Energie, die direkt als Elektrizität rückgewonnen wird, ohne den Umweg über Dampfturbinen. Das Besondere ist die direkte Stromerzeugung und die Verwendung von neutronischem Brennstoff (D-He3), was die Produktion von Neutronen minimiert und die Energieausbeute effizienter macht [9b]

3.2 Trägheitsfusion

Bei der **Trägheitsfusion** (IFE: „inertial fusion energy“) wird ein millimetergroßes Kugelchen (sog. Target) aus gefrorenem Brennstoff (in der Regel ein Deuterium-Tritium-Gemisch) mit hochintensiver Laserstrahlung in Bruchteilen einer Sekunde beschossen, siehe Abb. 14,15. Das Kugelchen erreicht dadurch Temperaturen von > 100 Millionen Grad Celsius, Drücke von hunderten Gigabar und Dichten von mehr als 1.000-fache Festkörperdichte. Im Gegensatz zur Magnetfusion werden die Fusionsbedingungen jeweils nur für einen sehr kurzen Zeitraum – in der Regel wenige Nanosekunden lang – erreicht. Durch den stark komprimierten Zustand können Fusionsreaktionen stattfinden, bevor das Target durch die freigesetzte Energie auseinandergetrieben wird (Abb. 14):

Siehe dazu Abb. 14: Ablaufschema der Trägheitsfusion



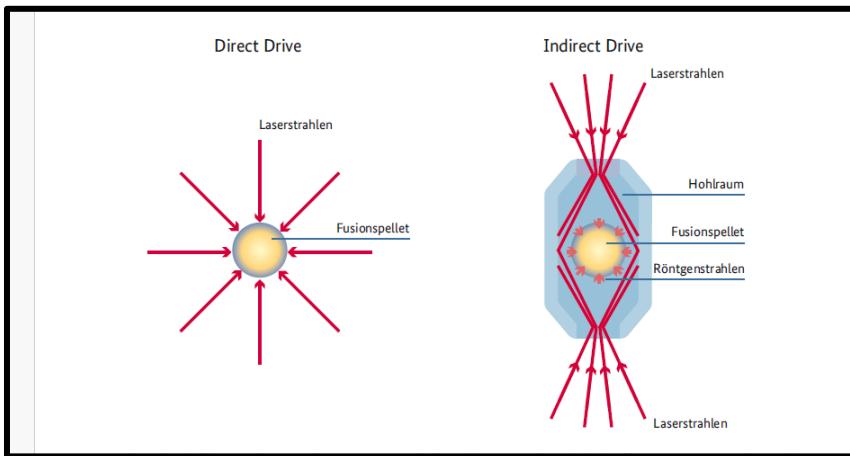
Quelle: Focused Energy

Bei der Trägheitsfusion gibt es im Schwerpunkt 2 Verfahren (Abb. 15): Am weitesten fortgeschritten ist das sogenannte Indirect-Drive-Verfahren (IDD), zum Einsatz in Testanlagen kommen aber auch das Direct Drive (DD) und andere Verfahren. Das Direct Drive Verfahren ist fünfmal so effizient wie das Indirect Drive Verfahren.

Beim **Indirect Drive** befindet sich das Target mittig in einem Hohlraum. Die Laserstrahlen dringen zunächst in diesen Hohlraum ein und werden dort in Röntgenstrahlung umgewandelt. Diese Röntgenstrahlung wirkt anschließend gleichmäßig auf die Kapsel ein und komprimiert sie.

Beim **Direct drive** beschießen die Laserstrahlen die Brennstoffkugel von vielen Seiten direkt. Für eine gleichmäßige Kompression und die Zündung ist eine hochsymmetrische Energieverteilung erforderlich; die Laserimpulse müssen daher die Brennstoffkugel von allen Seiten sehr genau und nahezu zum gleichen Zeitpunkt treffen.

Abb. 15: Verfahren der lasergetriebenen Trägheitsfusion [2].



[2] S.12

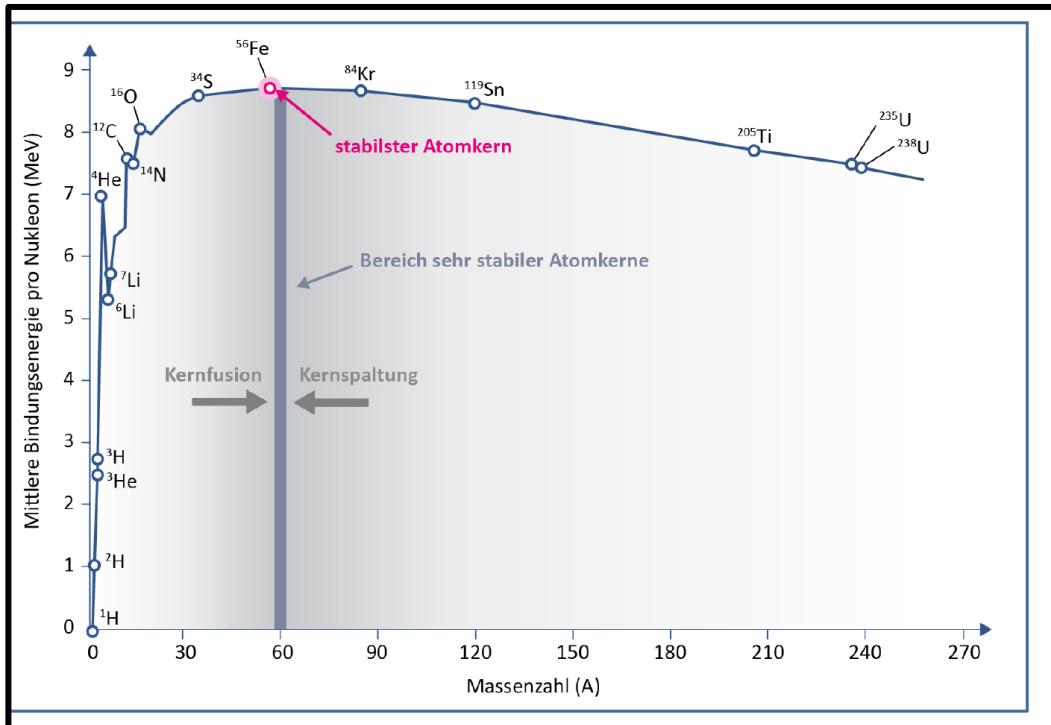
Zusammenfassend siehe

Exkurs 10: Vergleich Kernspaltung, Kernfusion

Sowohl bei der Kernfusion als auch bei der Kernspaltung handelt es sich um die Freisetzung von Bindungsenergie aus Atomkernen. Bei der Kernfusion wird Energie freigesetzt, indem leichte Atomkerne (Deuterium, Tritium), das heißt Kerne mit einer geringen Anzahl an Nukleonen, miteinander verschmelzen.

Im Gegensatz dazu wird bei der Kernspaltung durch den Prozess der Spaltung von schweren Atomkernen (Uran, Plutonium), die eine hohe Nukleonenanzahl aufweisen, Energie freigesetzt (Abb. 16). Als Produkte entstehen hierbei Elemente mit einer geringeren Zahl an Nukleonen im Atomkern.

Abb. 16 : Einordnung der Kernfusion und Kernspaltung anhand der Teilchen im Kern (Massenzahl) [5],



Quelle: angepasst an LibreTexts, CC BY 4.0 Deed

Exkurs 11: Projekte auf Basis Trägheitsfusion

Im Bereich der **Trägheitsfusion** sind laut IAEA derzeit weniger als 10 Forschungsanlagen in Betrieb. Das herausragende Projekt ist das NIF (National Ignition Facility). Die NIF am Lawrence Livermore National Laboratory ist vor allem eine militärische Forschungseinrichtung. Die NIF Anlage ist das am weitesten entwickelte System zur Trägheitsfusion. So kann die NIF den derzeit stärksten Laser der Welt nutzen. Seine Energie erzeugt indirekt über mehrere Zwischenschritte die Kombination von hoher Temperatur und Dichte, die ein Plasma zündet. NIF erreichte in 2025 einen Rekord Q-Faktor von > 4, Deutschland ist im Bereich **Trägheitsfusion** mit den Start-up Projekten **Focused Energy** [14] und **Marvel Fusion** aktiv.

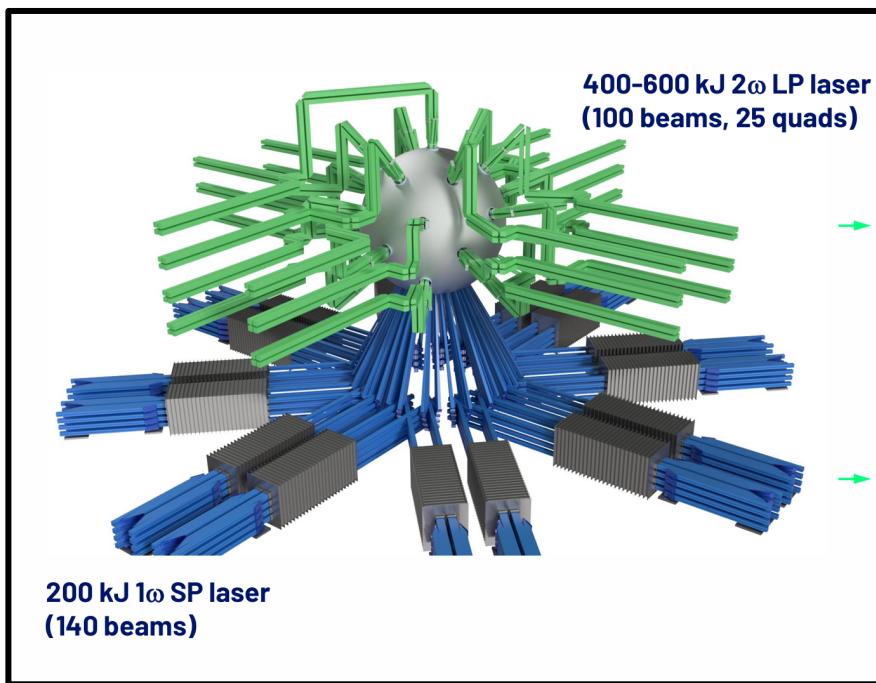
Focused Energy: Focused Energy ist eine Anlage auf Basis der Trägheitsfusion. Der Reaktor soll aus ca. 0,4 cm großen Brennstoffkugeln aus gefrorenem D/T Fusionsenergie erzeugen. Bei

der Fusion trifft gebündeltes Laserlicht von bis zu 2000 Lasern auf die Kugelchen. Die Laserstrahlen werden über Rohre zu den Brennstoffkügelchen gelenkt. Dort passiert mit jedem Laserpuls die Fusionsreaktion (Abb. 17).

Der oben beschriebene Erfolg am NIF, bei dem rund das 4-Fache der in das Target eingestrahlten Laserenergie als Fusionsenergie freigesetzt wurde, stellt zwar einen wichtigen wissenschaftlichen Meilenstein dar. Der Wirkungsgrad der verwendeten Laser liegt jedoch nur im Bereich weniger Prozent, sodass der Gesamtenergieaufwand der Anlage weiterhin deutlich über der erzeugten Fusionsenergie liegt. Entscheidend ist daher, den Wirkungsgrad der Laser um mindestens einen Faktor 10 bis 20 zu steigern. Mit der Anlage von Focused Energy soll im ersten Schritt 45 % der zugeführten Energie erzeugt werden.

Mit Focused Energy soll bis Ende der 30-iger Jahre mit einem Demo-Reaktor Energie erzeugt werden. Focused Energy ist ein deutsch-amerikanisches Breakthrough-Startup, das die Kommerzialisierung der laserbasierten Kernfusion zum Ziel hat.

Abb. 17: geplantes Laser-Fusionskraftwerk von Focused Energy [14].



Marvel Fusion: *Marvel Fusion ist ein deutsches Startup aus München auf Basis Trägheitsfusion, das in den USA eine Demonstrationsanlage plant. Marvel Fusion will die Entwicklung seines Kernfusionskraftwerks in den USA vorantreiben. Die Technologie beruht auf ultrakurzen Laserpulsen mit entsprechender Leistungsdichte. Eine neue Anlage soll es Marvel Fusion ermöglichen, die Entwicklung seines eigenen Fusionskonzepts erheblich zu beschleunigen und so den Weg zu einem funktionierenden Kraftwerk zu ebnen. Das 150-Millionen-Euro-Projekt wird zu großen Teilen von privaten Geldgebern finanziert.*

4. Nationale Strategien und Ambitionen

Die Entwicklung der Kernfusion wird von einer neuen globalen Dynamik getragen. Staaten und Unternehmen investieren massiv, weil Fusionsenergie als Schlüsseltechnologie für Versorgungssicherheit, Klimaneutralität und wirtschaftliche Souveränität gilt. Die Strategien unterscheiden sich nach Region, Technologiefokus, Zeithorizont und Fördervolumen.

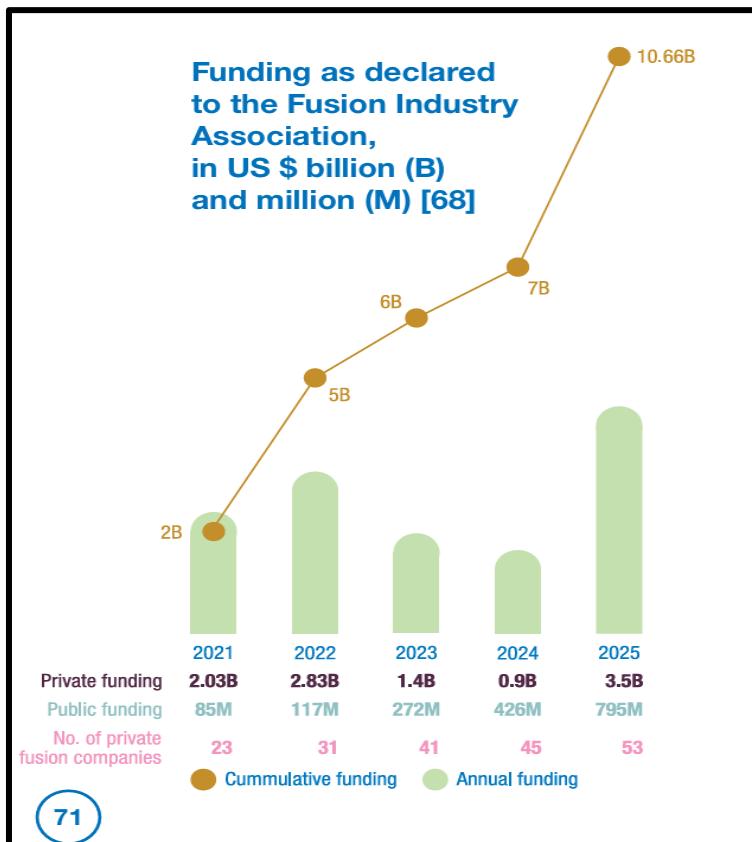
Die Internationale Atomenergie-Organisation (IAEA) listet derzeit **weltweit 144 Fusionsprojekte** auf [9], die vorrangig von staatlichen Forschungseinrichtungen (rund 75 %), zunehmend aber auch von halbstaatlichen oder privaten Start-ups betrieben werden (Abb. 19). Sie befinden sich in unterschiedlichen Entwicklungsphasen. Die meisten Anlagen stehen in den USA (35), Japan (25), Russland (13), China (25) und Großbritannien (9). In der EU sind es zusammen 21 Projekte, in Deutschland 5 Projekte.

Unabhängig von dem zentralen internationalen Projekt ITER (**Exkurs 8**) betreiben die einzelnen Länder mehr oder weniger massiv eigene Initiativen. Die Gründe sind:

- (i) nationale Unabhängigkeit,
- (ii) die Aussicht auf die Realisierung von Projekten, die einen Wettbewerbsvorsprung versprechen,
- (iii) Know-how für eine nationale Umsetzung im Falle der erfolgreichen Realisierung von Kernfusion etc.

Zu den finanziellen Anstrengungen der einzelnen Ländern siehe **Kapitel 7**.

Abb. 18 Entwicklung des privaten Kapitals für die Fusionsenergie [9].



Quelle: IAEA 2025, S. 54

4.1 USA, Kanada

Die USA nehmen eindeutig die führende Rolle bei der Kernfusion ein (**Kapitel 7**). Die staatliche Finanzierung verteilt sich etwa in gleichem Umfang auf Magneteinschluss und Trägheitsfusion. Die USA betreiben weltweit Fusionsanlagen, darunter viele der größten.

Die USA unternehmen zahlreiche Aktivitäten zur Kommerzialisierung der Kernfusion. Jährliche öffentliche Förderung ca. 1,5 Mrd. USD. In den USA laufen auch die meisten privat finanzierten Start-Ups: Commonwealth Fusion, TAE, Helion (s.o.) etc.

Die USA arbeiten an einer Neuausrichtung der Aktivitäten für Kernfusion, getrieben durch die Konkurrenz von China und dessen fokussierte und beschleunigte Aktivitäten. Die Hauptmerkmale sind:

- 1) Die Aktivitäten zur Kernfusion werden in den USA in der DOE-Organisation klar gebündelt und gewährleisten eine abgestimmte

strategische Fokussierung. Deutschland, Großbritannien und Japan sind bevorzugte Kooperationspartner.

- 2) Die Roadmap für Fusionswissenschaft und -technologie mit einer umfassende nationalen Strategie zur Beschleunigung der Entwicklung und Kommerzialisierung der Fusionsenergie bis Mitte der 2030er Jahre. Sie zeigt einen klaren Weg für die Unterstützung der wachsenden Fusionsenergiebranche auf, identifiziert kritische Lücken in Wissenschaft und Technologie und definiert die Meilensteine, die erforderlich sind, um kommerziell Fusionsenergie ins Netz zu bringen.
- 3) Das Energieministerium veröffentlichte einen Fahrplan zur Entwicklung der Fusionsenergie, in dem eine Umstrukturierung der Wissenschaftsämter skizziert und neue Infrastrukturen gefordert werden, um große technologische „Lücken“ zu schließen. Der Entwurf ist der erste detaillierte Plan der zweiten Trump-Regierung zur Entwicklung der Fusion, die zwar noch nicht in großem Maßstab demonstriert wurde, aber das Potenzial hat, rund um die Uhr Strom mit geringen Emissionen zu liefern. Der Fahrplan sieht unter anderem die Finanzierung von sechs technischen Bereichen und die Festlegung neuer Messgrößen für die Branche vor.

Die Ankündigung des DOE kommt zu einem Zeitpunkt, an dem Investoren beispiellose Summen in die Fusionstechnologie stecken.

Kanada hat bisher noch keine nationale Fusionsstrategie formuliert. Kanada hat mit den USA ein Abkommen zur gemeinsamen Fusionsforschung geschlossen. Kanada bringt Know-how auf den Gebieten Deuterium- und Tritium-Produktion und deren Handhabung und auf den Gebieten Materialwissenschaften, Robotik und Fernhandhabung ein.

4.2 Europa

Deutschland

Deutschland ist in mehreren Bereichen der Fusionsenergieentwicklung führend, darunter Stellaratorforschung, Tokamakphysik, Fusionstechnologien, auch Trägheitsfusion. und Materialien sowie Plasma-Wand-Wechselwirkungen. Die deutsche Regierung hat ihre Bemühungen zur Kommerzialisierung der Fusion beschleunigt, da sie den Aufstieg

privater Unternehmen im Land erkannt hat und deren Beiträge und Engagement nutzen möchte

Unternehmen, die im Bereich der Fusionsenergie tätig sind, haben den Branchenverband Pro-Fusion (s. Kapitel 4.4) gegründet. Dieser Verband soll als Einstiegspunkt dienen, um zur Entwicklung des wirtschaftlichen Fusionsökosystems beizutragen.

Der erst im November 2025 veröffentlichte Fusionsaktionsplan der Bundesregierung „**Deutschland auf dem Weg zum Fusionskraftwerk**“ [4]. zielt darauf ab, den Fortschritt durch die Finanzierung von Infrastruktur und Technologiedemonstratoren zu beschleunigen, ein „Fusionsökosystem“ durch die Integration von Wissenschaft und Privatwirtschaft zu schaffen und einen unterstützenden rechtlichen und regulatorischen Rahmen zu gewährleisten. Außerdem soll Deutschland zu einem weltweit führenden Akteur in der Fusionstechnologie werden und durch Spill-Over-Effekte in verwandten Hightech-Sektoren wirtschaftlichen Mehrwert schaffen. Klar formuliertes Ziel ist der Bau des weltweit ersten Fusionskraftwerks in Deutschland.

Der **Fusionsaktionsplan** [4] der Bundesregierung, der 2024 beschlossen und 2025 weiter konkretisiert wurde, markiert einen ambitionierten strategischen Vorstoß. Das übergeordnete Ziel lautet: Der Bau des weltweit ersten kommerziellen Fusionskraftwerks in Deutschland. Bis 2029 sollen hierfür mehr als 2 Mrd. EURO/p.a. bereitgestellt werden, mit einem Zeitrahmen für einen Prototyp-Demonstrator bis 2040–2045.

Im Aktionsplan „Deutschland auf dem Weg zum Fusionskraftwerk“ wurden die wichtigsten Ziele nochmals konkretisiert. Die Bundesregierung verfolgt das Ziel:

- weltweit das erste Fusionskraftwerk in Deutschland zu bauen. Es soll vorrangig durch deutsche Unternehmen realisiert werden.
- zur Vorbereitung eines Demo-Kraftwerks den Aus- und Aufbau der entsprechenden Infrastrukturen zu fördern
- sich für die Ausbildung von entsprechenden Fachkräften einzusetzen
- langfristige und strategische Partnerschaften im internationalen Bereich ein zu gehen

Allein in dieser Legislaturperiode werden 2 Mrd. Euro an finanziellen Mitteln für die Kernfusion zur Verfügung stehen, nochmal deutlich über die bisherigen Planungen hinausgehend.

Thema	Maßnahme	Ziel
Infrastruktur und Technologie Demonstration	Finanzierung neuer Forschungsanlagen, Materialtests, Supraleitungs-Technologie	Technologische Validierung und Prototypenentwicklung
Fusionsökosystem	Verbindung von Wissenschaft und Privatwirtschaft, Bildung von Clustern	Vorbereitung der Kommerzialisierung
Rechtlicher und regulatorischer Rahmen	Modernisierung des Atomgesetzes, Beschleunigung von Genehmigungsverfahren	Regulatorische Sicherheit schaffen
Ausbildung und Fachkräfte	Ausbau universitärer Programme, gezielte Doktorandenförderung	Langfristige Nachwuchssicherung
Internationale Partnerschaften	Vertiefte Kooperationen mit USA, UK und EU	Technologietransfer und gemeinsame Projekte

UK

STEP Fusion ist das erste Programm seiner Art und das größte Technologie- und Infrastrukturprogramm Großbritanniens zum Bau eines Prototyps eines Fusionskraftwerks. Das Projekt ist in der Industrial Fusion Solutions, einer Tochtergesellschaft der UKAEA, organisiert. Es soll die Spherical Tokamak Energy Produktion voranzutreiben. Das Konzept unterscheidet sich von herkömmlichen Tokamaks durch eine fast kugelförmige Form des äußeren Randes des Plasmas. Diese Form bietet Vorteile wie eine höhere Magnetfeldeffizienz, eine verbesserte Plasmastabilität, eine bessere Einschließung und potenziell kleinere, kostengünstigere Reaktoren, was sie zu einem vielversprechenden Weg für die praktische Fusionsenergie macht.

Das britische Ministerium für Energiesicherheit und Netto-Null begann mit der Änderung von Vorschriften, um Fusionskraftwerke als national bedeutende Infrastrukturprojekte in England und Wales einzustufen. Diese Änderung wird die Bearbeitung von Bauanträgen beschleunigen, indem der Fokus auf spezifische lokale Probleme statt auf die Notwendigkeit der Technologie gelegt wird. Im Rahmen einer Konsultation werden Stellungnahmen zur nationalen Grundsatzerklärung eingeholt, bevor diese dem Parlament zur Genehmigung vorgelegt wird.

Zu ITER gab es ein Assoziierungsabkommen, dieses wurde jedoch nicht verlängert, sodass dass Großbritannien nun eigenständige und kooperative Bemühungen zur Förderung der Fusionsenergie verfolgt, ohne direkt bei ITER beteiligt zu sein.

Frankreich

Frankreich beherbergt ITER und mehrere andere Fusionsforschungsanlagen, darunter den Tokamak WEST und verschiedene Lasereinrichtungen. Darüber hinaus hat das Start-up-Unternehmen Renaissance Fusion, das ein Stellarator-Konzept mit HTS-Magneten und flüssigen Wänden entwickelt, seinen Sitz in Frankreich. Um die Forschung und Entwicklung in diesem Bereich zu unterstützen, prüft die französische Regierung, die Rahmenbedingungen zur Förderung von öffentlich-privaten Partnerschaften zu verbessern.

4.3 Asien

Korea

Im Juli 2024 kündigte Korea eine erhebliche Investition in Höhe von etwa 900 Millionen \$ in die Entwicklung der Fusionsenergie an. Diese Initiative, die im Jahr 2026 beginnen und über ein Jahrzehnt andauern soll, zielt darauf ab, die Fusionskraftwerkstechnologie durch eine öffentlich-private Partnerschaft voranzubringen. Der Plan umfasst den Bau einer Pilotanlage mit einer Stromerzeugungskapazität von 100 MW in den 2030er Jahren, deren Betrieb in den 2040er Jahren aufgenommen werden soll. Das übergeordnete Ziel ist die Schaffung eines privat geführten industriellen Ökosystems für Fusionsenergie.

Japan

Das japanische JT-60 (kurz für Japan Torus-60) ist weltweit der größte in Betrieb befindliche supraleitende Forschungstokamak. Seit 2023 ist die Anlage unter dem Namen JT-60SA (SA: Super Advanced) in Betrieb, ITER wird nach Inbetriebnahme allerdings größer sein. Er wurde gemeinsam von der Europäischen Union und Japan in Naka gebaut und wird dort betrieben [9] Diese Ausführung umfasst einen D-förmigen Plasmaquerschnitt, supraleitende Spulen und eine aktive Rückkopplungssteuerung. Forschungsschwerpunkte: Magnetfeldgeometrie, Plasmakontrolle und Materialtests.

In 2023 verabschiedete Japan seine erste nationale Strategie zur Fusionsenergie, die den Schwerpunkt auf die Schaffung einer heimischen Fusionsenergieindustrie mit einer breiteren Beteiligung des privaten Sektors an Forschung und Entwicklung legt. Diese Strategie umfasste die Gründung des Japan Fusion Energy Council zur Förderung verwandter Industrien und zur Entwicklung von Richtlinien für die Regulierung der Fusionsenergietechnologie.

Im Jahr 2024 kündigte die japanische Regierung ein neues Forschungs- und Entwicklungsprogramm für die Fusion als Teil ihres Moonshot Forschungs- und Entwicklungsprogramms an und bekräftigte damit ihr Engagement für die Weiterentwicklung der Fusionstechnologie. Die Regierung plant außerdem, der Ausbildung für die Förderung der Fusionstechnologie zu verstärken und sicherzustellen, dass die nächste Generation von Wissenschaftlern und Ingenieuren gut vorbereitet ist, um einen Beitrag in diesem Bereich zu leisten. Ergänzt werden diese Bemühungen durch die strategische Partnerschaft mit den USA zur Beschleunigung der Entwicklung der Fusionsenergie.

Japan unterstützt als Gründungsmitglied das ITER-Projekt.

China

China baut sein Fusionsenergieprogramm dynamisch aus und erhöht jährlich seine Investitionen. Diese Vision wird durch die Gründung eines Konsortiums unter der Leitung der China National Nuclear Corporation unterstrichen, das sich der Entwicklung der Fusionsenergie widmet. Das

Konsortium umfasst 25 staatliche Unternehmen und Forschungsinstitute, darunter einige der größten Energie- und Stahlunternehmen des Landes.

China unterstützt ebenfalls als Gründungsmitglied das ITER-Projekt.

China hat seine Fördermittel für die Kernfusion deutlich erhöht. Die Investitionen werden seit 2023 auf 6,5 - 13 Mrd. \$ geschätzt mit dem Ziel der kommerziellen Nutzung ab 2030.

Die bisherigen Aktivitäten in China konzentrierten sich auf **EAST**. Es ist ein Vorgänger-Reaktor auf Basis Tokamak. Mit **EAST** wurde in diesem Jahr ein Rekord für die Einschlusszeit aufgestellt.

China hat eine neue Anlage namens **CRAFT** zu 90 % fertiggestellt. Die Fertigstellung erfolgte innerhalb eines Jahres. Das zeigt die Dynamik des chinesischen Kernfusions-Vorhabens. Bei **CRAFT** handelt es sich um einen Ort, an dem alle Fusionsprüfstände zusammengeführt sind: Magnetfeldtests, Ringfeld-Magnetspulen, Materialtest und Supraleitungs-Tests. Das Ziel ist, alle nötigen Komponenten für einen Demo-Reaktor zusammen zu schließen.

CRAFT arbeitet nicht als Hochtemperatur-Supraleiter-Tokamak-Anlage, sondern als eher klassisches Niedertemperatur-Supraleitergerät, aber es wird eine Maschine der ITER-Klasse sein, mit der der scientific break-even erreicht werden soll. **CRAFT** soll die Lücke zum ITER schließen. Das zeigt auch wie China die Fortschritte bei ITER für nationale Zwecke nutzt.

BEST wird unweit der **CRAFT**-Plattform (Comprehensive Research Facility for Fusion Technology) gebaut.

BEST soll einen Nettoenergiegewinn erzielen, ein fundamental wichtiger Meilenstein und ist ein wesentlicher Bestandteil von Chinas langfristiger Roadmap für Fusionsenergie. **BEST** soll bis 2027 fertiggestellt sein. Mit **BEST** soll auch der Tritium-Produktionszyklus validiert werden.

Die gesamten Entwicklungen münden in den China Fusion Engineering Test Reactor (**CFETR**). Dieser soll in zwei Phasen betrieben werden. In der ersten Phase soll **CFETR** einen stabilen Betrieb und Tritium-Selbstversorgung mit einem Tritium-Brütungs-Verhältnis > 1 nachweisen. Darüber hinaus soll der

CFETR in Phase 1 die Erzeugung von Fusionsenergie mit einer Leistung von bis zu 200 MW erreichen.

In der zweiten Phase, der DEMO-Validierungsphase, muss der **CFETR** eine Leistung von über 1 GW erzeugen. Generell wird der **CFETR** auch als Forschungs- und Entwicklungsinstrument für die Prüfung verschiedener struktureller und funktioneller Materialien dienen, um ein Material mit hoher Neutronenflussresistenz zu identifizieren oder zu entwickeln.

Das Wall Street Journal (WSJ) vermutet [11], dass China für Fusion mehr Geld ausgibt als die USA, insbesondere für die Entwicklung der kommerziellen Kernfusion. Es gibt eine wachsende Besorgnis unter amerikanischen Politikern und Wissenschaftlern, dass der frühe Vorsprung der USA schwindet. Im Wall Street Journal [11] wird eine Quelle zitiert, wonach China zehnmal so viele Doktoren in Fusionswissenschaft und -technik hat wie die USA. Im WSJ [11] wird eine Quelle zitiert, wonach China zehnmal so viele Doktoren in Fusionswissenschaft und -technik hat wie die USA. In der Vergangenheit war China auf Spitzenvissen und Spitzengeschickungen von Studenten angewiesen, die in den Westen geschickt wurden (z. B. auch zu ITER und relevante Zulieferfirmen). Diese Zeiten sind vorbei. Heute bildet China weitaus mehr Spitzenvissenschaftler und -ingenieure im Bereich der Kernfusion aus als die USA. China strebt offensichtlich die führende Rolle bei der Fusionstechnologie an. Dies sollte von den USA und den EU-Ländern aufmerksam beobachtet werden.

Vergleichstabelle: Nationale Strategien und Leitprojekte

Land/Region	Hauptfokus	Fördervolumen	Zeithorizont	Leitprojekte
USA	Tokamak, Trägheitsfusion, Private	1,5 Mrd. \$/Jahr	Pilot ab 2035+	ARPA-E, NIF, SPARC, ITER, Helion W7-X,
Deutschland	Stellarator, Hybrid/Startups	2+ Mrd. € bis 2029	Demo ab 2040	DEMO, Pro- Fusion, Proxima
UK	STEP, Regulierungen	1,5 Mrd. £	STEP: ab 2040	STEP, UKAEA

China	Tokamak/Engineering	6,5–13 Mrd. \$	Kommerziell ab 2030	EAST, CFETR, CRAFT, BEST
Japan	Industrieaufbau, JT-60SA	>1 Mrd. \$	Pilot ab 2038+	JT-60SA, Broader Approach, Moonshot
Frankreich	ITER, Stellarator, Laserfusion	2+ Mrd. €	ITER ab 2035	ITER, WEST, Renaissance

Fazit

Der globale Wettbewerb um die Führungsrolle bei der Kernfusion ist entfacht. Die USA, China stehen im starken Wettbewerb mit ehrgeizigen Zielen, Europa investiert mit unterschiedlichen Prioritäten und Zeitplänen. Private Unternehmen und Startups werden zu zentralen Innovationstreibern und ergänzen die bestehenden nationalen Strategien. Kooperationen zwischen Staat, Industrie und Wissenschaft sowie ein günstig regulatives Umfeld beschleunigen die Entwicklung. Deutschlands Position ist strategisch aussichtsreich, insbesondere durch die Verknüpfung von Forschungsexzellenz und industrieller Wertschöpfung. Dies sollte konsequent gefördert und genutzt werden.

4.4 wichtige nationale und internationale Kooperationen

IAEA: Die IAEA unterstützt und koordiniert die Zusammenarbeit ihrer Mitgliedstaaten und anderer Partner, organisiert regelmäßig Treffen der Gruppe, um die Fortschritte bei der Erreichung dieser Ziele zu überprüfen, ein hohes Maß an politischem Engagement sicherzustellen und weitere gemeinsame Maßnahmen im Bereich der Fusionsenergie zu fördern. Durch diese Bemühungen fördert die IAEA kontinuierliche Fortschritte und die Zusammenarbeit bei den weltweiten Bemühungen um die Entwicklung der Fusionsenergie.

EUROfusion: In 2014 unterzeichneten Fusionsforschungsinstitute aus den Mitgliedstaaten der Europäischen Union und der Schweiz eine Vereinbarung zur Festigung der europäischen Zusammenarbeit in der Fusionsforschung. Damit wurde EURO Fusion, das Europäische

Konsortium für die Entwicklung der Fusionsenergie, ins Leben gerufen. Eurofusion betreibt die gemeinsamen Bemühungen der Europäischen Union zur Förderung der Fusionsenergie, darunter die EU-Fusionsstrategie, das ITER-Projekt und Fusion for Energy. Die Strategie, die bis Ende 2025 fertiggestellt sein soll, zielt darauf ab, die Kommerzialisierung der Fusion zu beschleunigen, die Beteiligung des privaten Sektors zu verstärken und ein wettbewerbsfähiges industrielles Ökosystem aufzubauen. Zu den wichtigsten Zielen gehören die Festlegung eines Weges zu einem Pilot-Fusionskraftwerk und die Stärkung der internationalen Zusammenarbeit.

Pro-Fusion ist der Name eines neuen Industrieverbandes in Deutschland, der im Juni 2024 gegründet wurde und sich auf die Kernfusion konzentriert. Zu den Mitgliedern gehören bekannte Unternehmen und Organisationen wie Bilfinger Nuclear & Energy Transition, Focused Energy, Framatome, Marvel Fusion, Proxima Fusion und Siemens Energy Global.

Allgemein herrscht die Meinung vor, dass in Europa durch ein zu große Zahl an nationalen und europäischen Gremien die Steuerbarkeit und Fokussierung auf wenige multi-nationale Vorhaben fehlt, ganz im Gegensatz zu USA und China, wo eine übergreifende top-down Organisation sämtliche untergeordnete Aktivitäten ausrichtet und koordiniert.

Die Aufgabe der britischen Atomenergiebehörde (**UKAEA**) besteht darin, die Bereitstellung nachhaltiger Fusionsenergie voranzutreiben und den wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Nutzen zu maximieren. Dies wird durch die Verwaltung des britischen Fusionsprogramms, die Pionierarbeit im Bereich der Fusionsrobotik, die Entwicklung innovativer Technologien und die Förderung einer engen Zusammenarbeit mit der Industrie und internationalen Partnern erreicht.

Fusionsprogramme in China

Die umfangreichsten Aktivitäten erfolgen im Rahmen des überwiegend staatlich finanzierten Programms unter Leitung des ASIPP (Institut für Plasmaphysik der Chinesischen Akademie der Wissenschaften). Das ASIPP verfolgt eine eher klassischen Ansatz mit konventionellen (LTS) Supraleitern für die Magnetfusion.

Geld fließt mittlerweile aber auch von privater Seite (Elektro-Autoindustrie, Computerspieleindustrie...) in Unternehmen wie Energy Singularity, die mit dem Projekt HH70 eine HTS basierte Lösung verfolgen.

5. Die wichtigsten laufenden Projekte zur Kernfusion im Überblick

Die internationale Forschungslandschaft der Kernfusion ist von großer Dynamik geprägt. Über 140 Projekte befinden sich weltweit in unterschiedlichen Stadien. Neben den staatlich geförderten Großprojekten gibt es zunehmend ambitionierte private Initiativen, die mit innovativen Konzepten und schnelleren Entwicklungszyklen eine wichtige Rolle spielen. Dieses Kapitel gibt einen kompakten Überblick zu den Schlüsselprojekten, Aufteilungsprinzipien und jüngsten Rekorden.

Haupttechnologien im Überblick

Magnetischer Einschluss:

- Tokamak (z.B. ITER, JET, EAST, ASDEX)
- Stellarator (z.B. Wendelstein 7-X, GAUSS Fusion, Proxima Fusion)
- Weitere Konzepte (privat finanziert): Commonwealth Fusion (CFS) basiert auf HTS), TAE (Field-Reversed Configuration , General Fusion (magnetisch unterstützt, mechanische Kompression), Helion (Direktstromerzeugung)

Trägheitsfusion (Laser):

- Indirect Drive: NIF (USA) als zentraler Referenzpunkt ($Q > 4$, Stand 2025)
- Direct Drive: Marvel Fusion, Focused Energy (Startups, Europa/USA)

Staatliche Großprojekte

ITER/DEMO (Frankreich)

- Das größte Fusions-Großprojekt weltweit, getragen von einer internationalen Partnerschaft (EU, USA, China, Japan, Südkorea, Indien, Russland)
- Ziel: Demonstration des wissenschaftlichen und technologischen „Break-even“ ($Q = 10, 500$ MW)
- Geplanter Experimentierbetrieb ab 2035, Fertigstellung zu Beginn der 2040er Jahre
- Budgetrahmen: 18–22 Mrd. EUR (+5 Mrd. EUR bis zur Fertigstellung)

JET (Großbritannien)

- Bis 2024 das weltweit größte Tokamak-Experiment
- Testumgebung für ITER-Technologien und -Brennstoffe
- Rekord 2023: 69 MJ Fusionsenergie in einer 5-Sekunden-Entladung mit 0,2 mg Deuterium-Tritium-Gemisch

EAST (China)

- Chinas Vorzeige-Tokamak, mehrfacher Plasmarekord (z. B. 18 Minuten stabiler Einschlüsse bei 180 Millionen °C in 2025)
- Enge Einbindung in die nationale Roadmap (CFETR, BEST)

JT-60SA (Japan)

- Modernste Tokamak-Testanlage außerhalb von ITER
- Forschungsschwerpunkte: Magnetfeldgeometrie, Plasmakontrolle und Materialtests
- Wichtiger Demonstrator für industrielle Komponenten
-

Herausragende private und halbstaatliche Initiativen

Commonwealth Fusion Systems (SPARC/ARC) – USA

- Tokamak-Konzept mit Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) für ultrastarke Magnetfelder
- Ambition: $Q \geq 10$ und Prototyp für Kraftwerksbetrieb vor 2035
- Über 2 Mrd. \$ Finanzierungsvolumen, starke Einbindung von MIT und Energiegiganten

TAE Technologies – USA

- Field-Reversed Configuration, deutliche Konzeptalternative zum klassischen Tokamak
- Zielt auf Wasserstoff-Bor-Fusion (neutronenarm), Verzicht auf Tritium !
- Erprobt Pilotprototypen-Verfahren, Ziel: Netzstrom vor 2035

Helion Energy – USA

- Pulsbetrieb, sogenanntes "Fusionszischen"
- Direkte Umwandlung der Fusionsenergie in Strom, Verzicht auf Dampfturbinen
- Microsoft ist als erster kommerzieller Käufer für geplante Stromlieferung geplant

Gauß Fusion und Proxima Fusion – Deutschland

- Stellarator-Startups, automatische Spulenoptimierung und KI-gestützte Simulationsverfahren
- Ziel: Industrielle Skalierung von Stellarator-Konzepten und Kostenreduktion
- Kooperationen mit Industrieunternehmen und Max-Planck-Instituten

Focused Energy und Marvel Fusion – Deutschland/USA

- Trägheitsfusion mit ultra-energiereichen Laserpulsen (Direct Drive)
- Kompromisslos kurzer Puls, Targetdesign für maximale Energieausbeute
- Ziel: Lieferung von Prototypenmodulen innerhalb von 10 Jahren

Projektpriorisierung und jüngste Rekorde

Schlüsselprojekte:

- ITER: Proof-of-Concept 2035, Wirtschaftlichkeitsbeweis mit dem Nachfolgeprojekt Demo, erwartet ab Angang der 40-iger Jahre
- NIF: Trägheitsfusion, 2025 $Q > 4$ nachgewiesen (8,6 MJ Output)
- CFETR/BEST (China): erster kommerzieller Reaktor ab 2030 angestrebt

Wichtige Folgeprojekte:

- STEP (UK): Nettoenergieverifikation bis 2040
- JT-60SA, ASDEX-Upgrade: Material- und Plasmaparameteroptimierung

Startup-Dynamik:

- Private Projekte mit ambitionierteren Zeitlinien, hoher Kapitaldynamik
- IT-Konzerne und Venture Capital als Trendbeschleuniger

Fazit Kapitel 5

Die internationale Fusionsforschung steht am Beginn einer neuen Beschleunigungsphase: Schlüsselprojekte demonstrieren regelmäßig neue Leistungsrekorde und profitieren von privaten Investitionen. Die kommenden Jahre werden zeigen, ob die Vielzahl paralleler Ansätze tatsächlich zum ersehnten “Fusionsdurchbruch” vor Mitte des Jahrhunderts führen kann.

6. Woher der Optimismus für das Gelingen der Kernfusion?

Während die Kernfusion jahrzehntelang als Science-Fiction-Projekt galt und der Spruch „immer 30 Jahre entfernt“ kursierte, hat sich die Situation in den letzten Jahren grundlegend gewandelt. Technologische Rekorde, geopolitische Dringlichkeiten und massive private Investitionen nähren eine neue Hoffnung: Kernfusion könnte tatsächlich realisierbar sein. Dieses Kapitel analysiert systematisch die Gründe für diesen gewandelten Optimismus.

Dank dieser Fortschritte in den letzten Jahren ist die Welt an einem Punkt angekommen, an dem KF nicht mehr nur ein hypothetisches Zukunftsversprechen ist, **sondern konkret machbar erscheint**.

Die bisher Pessimismus suggerierende Situation hat sich geändert. Der Klimawandel stellt eine immer sichtbarere Bedrohung dar. Ein Königsweg zur Verhinderung einer katastrophalen Entwicklung der Erderwärmung ist trotz vieler Fortschritte- nicht erkennbar. Auch ist nicht erkennbar, dass die wichtigsten globalen Akteure den Weg zu einem kollektiven und konzertierten Aktionsplan finden. Umso mehr rückt die Kernfusion als Hoffnungsträger in den Vordergrund.

Dass die Arbeiten an den zahlreichen Kernfusions-Projekten voranschreiten, zeigen die in den letzten Jahren erzielten Rekordwerte, welche mit einer viel schnelleren zeitlichen Abfolge passieren als in den Jahrzehnten davor.

Technische Durchbrüche und Rekorde

Die Erfolgsgeschichte der Kernfusion manifestiert sich in drei zentralen Bereichen: Magnetische Fusionsanlagen, Trägheitsfusion und technologie-ermöglichte Innovationen.

Magnetische Fusionsanlagen – Langzeitrekorde

Das JET-Tokamak (Großbritannien, 2023) erzielte einen Weltrekord mit 69 Megajoule Fusionsenergie in einer 5-Sekunden-Entladung – aus nur 0,2 Milligramm Deuterium-Tritium-Gemisch. Dieser Nachweis zeigt, dass hochenergetische Fusionsreaktionen stabil ablaufen können.

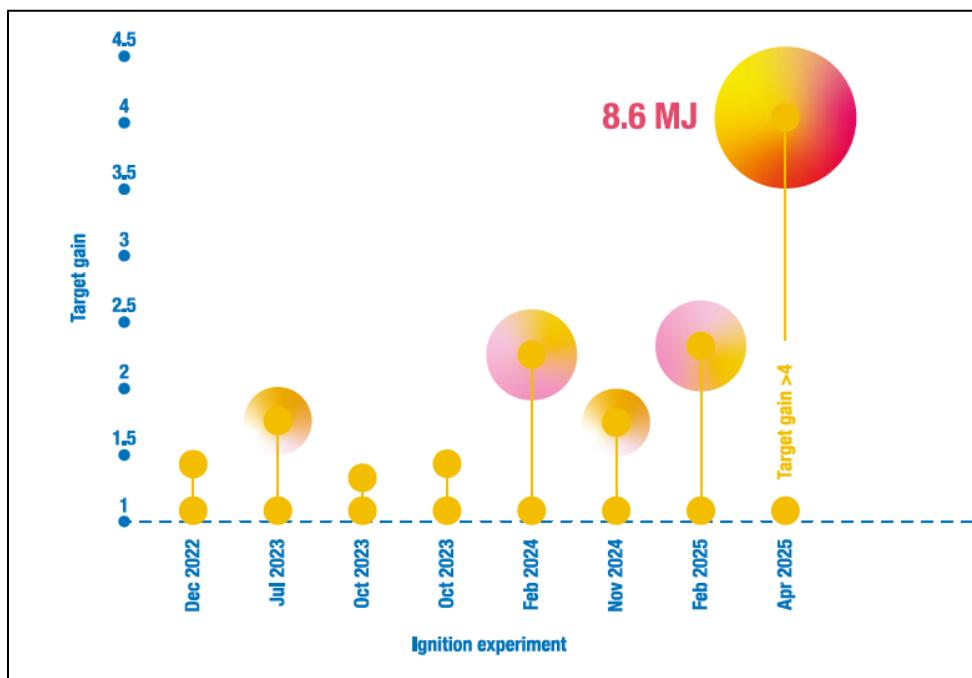
Das EAST-Tokamak (China, 2025) stellte einen neuen Rekord auf: 18 Minuten stabiler Magneteinschluss bei 180 Millionen Grad Celsius. Dies belegt, dass Stabilität und Dauerbetrieb zunehmend machbar werden, und unterstreicht Chinas rapiden Fortschritt und Ambition.

Trägheitsfusion – Das wissenschaftliche Break-even

Die National Ignition Facility (NIF, USA) erreichte im April 2025 einen Q-Faktor >4 (8,6 MJ Output bei 2,08 MJ Input). Damit ist NIF die erste Anlage weltweit, die mehr Energie erzeugt als investiert – das Ziel wissenschaftlicher Break-even ist erreicht. Die kontinuierlich steigenden Energieausbeuten von Versuch zu Versuch unterstreichen die Dynamik (siehe Abb. 19).

Implikationen für die Wirtschaftlichkeit: Scientific Break-even ist bewiesen. Nächstes Ziel: Economic Break-even mit $Q >10-15$ für kommerzielle Rentabilität.

Abb. 19: sukzessive Steigerung der Q-Faktoren (target gain) am NIF [9].



Quelle: IAEA 2025, S. 12

Technologische Innovationen als Ermöglicher

Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) ermöglichen Magnetfelder bis 20 Tesla (vs. 6–13 Tesla bei ITER). Commonwealth Fusion nutzt HTS im SPARC-Projekt für kompaktere, effizientere Tokamaks.

Laser- und Materialtechnologie: Ultrakurz-Laserpulse machen Direct-Drive-Trägheitsfusion 5x effizienter als Indirect Drive.

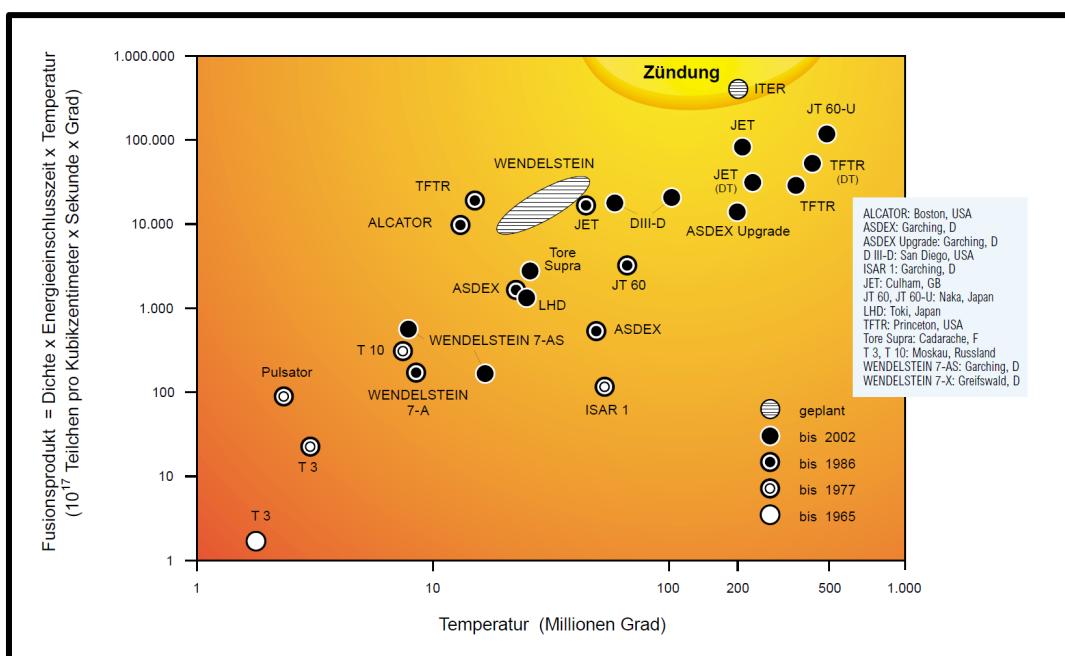
Neue Materialien schützen vor Neutronen und ermöglichen Tritium-Breeding.

Digitale Simulation optimiert Stellarator-Spulenkonfigurationen.

- In der WEST-Anlage (Tokamak) im südfranzösischen Cadarache, haben es die Forscher geschafft, das Plasma ganze 1337 Sekunden (22 Minuten und 17 Sekunden) lang in Bewegung zu halten und damit den kurz vorher aufgestellten Weltrekord des chinesischen EAST-Reaktors übertroffen.
- Der Fusionsreaktor Wendelstein 7-X, der weltweit größte Stellarator, hat im Mai 2025 einen Energieumsatz von 1,8 Gigajoule bei einer Plasmadauer von 360 Sekunden erzielt. Das Tripelprodukt konnte für eine Plasmadauer von über 43 Sekunden auf Rekordniveau gehalten werden.
- Die verschiedenen Projekte nähern sich auf der Zeitachse immer zahlreicher und schneller dem Lawson-Kriterium (Abb. 20).

Zu Tripelpunkt und Lawson-Kriterium siehe **Exkurs 4**.

Abb. 20: Fortschrittsdynamik bei der Zielerreichung für die verschiedenen Technologien



Quelle: MPI für Plasmaphysik

Dynamik der privaten Kapitalisierung

Ein fundamentaler Wandel: Erstmals investieren private Unternehmen und Tech-Konzerne massiv in Fusion. Kapitalflüsse (2021–2024): +300% Wachstum auf über 10 Mrd. USD kumulativ. Key Players: Gates, Bezos, Altman, Microsoft, Google.

Startups mit ambitionierten Zeitplänen:

- Commonwealth Fusion (SPARC): Q>10 bis 2035
- Helion Energy: Microsoft-Stromliefervertrag ab ~2028
- TAE, General Fusion, Focused Energy: Parallele Ansätze

Effekte: Wettbewerb beschleunigt Entwicklung, ermöglicht schnellere Prototyp-Iterationen und marktorientierte Kostenminimierung – im Gegensatz zu staatlichen Projekten.

Geopolitischer und energiepolitischer Kontext

Die Klimakrise treibt Fusion voran: Globaler Energiebedarf verdoppelt/tripliziert sich bis 2050; Erneuerbare reichen allein nicht (Dunkelflauten, Speicherdefizite). Fusion positioniert sich als strategische Hoffnungstechnologie.

Geopolitische Dimension: USA-China-Wettlauf um Führerschaft. China investiert 6,5–13 Mrd. USD (vs. 1,5 Mrd. USD/Jahr USA) und bildet 10x mehr Fusions-PhDs. Europa sorgt sich um Souveränität. Der Ukraine-Krieg (2022) verstärkte Energieunabhängigkeitsforderungen; Fusion bietet CO₂-freie Grundlast.

Strukturelle Gründe für Hoffnung

Von Science-Fiction zu Engineering-Challenge

Früher: „Fusion immer 30 Jahre entfernt“. Paradigmenwechsel: Physik bewiesen (Q>1); verbleiben Ingenieurfragen. Frage: Nicht „Geht es?“, sondern „Wie schnell und günstig?“

Technologie-Spillover und Spin-over

Möglicherweise bringen die großen Anstrengungen zur Realisierung der Kernfusion Spin-Offs ans Tageslicht. Solche Spin-Offs können für

Investoren eine Streuung der Investitionsrisiken zur Folge haben. Investitionen in die Fusionsenergieforschung und ihre Kommerzialisierung versprechen erhebliche wirtschaftliche Vorteile, die weit über das Potenzial der Dekarbonisierung hinausgehen. Hierbei ist insbesondere an Anwendungsfelder zu denken wie Materialien (Raumfahrt), Analysemethoden, Medizin (MRT), Optik, Diagnostik, Robotik, Magnettechnologie, Suprateilung, Hoch-Temperatur-Supraleitung. Insbesondere HTS ist durch die Tokamak-Technik entwickelt worden

Fusion profitiert von:

- KI-Simulationen (Plasmakontrolle)
- Materialwissenschaften (Neutronenschutz)
- Hochleistungselektronik (Magnete/Sensoren)
- Fertigung (3D-Druck Komponenten)

Zeitfenster-Konvergenz

Faktoren konvergieren zeitlich:

1. Technische Durchbrüche (2020er)
2. Politische Priorisierung (2020er)
3. Private Kapitalverfügbarkeit (2020er)
4. Energiekrise/Klimazwang (Gegenwart)

Folge: Schnellere Entwicklung als je zuvor.

Neue Dynamik der Zielerreichung: **die Ambition** ist, dass mit den Projekten der Start-Ups ein technologischer Durchbruch deutlich früher erreicht werden kann als das von ITER gesetzte Ziel.

ITER wird um 2036 in Betrieb gehen. Doch ITER soll noch keinen Strom erzeugen. Das Nachfolgeprojekt Demo, welches wirklich Strom liefern soll, ist für 2040 geplant. Hierbei soll das Zusammenspiel sämtlicher Kraftwerkskomponenten erprobt werden.

Das erklärte Ziel vieler Start-Ups ist die Realisierung der Stromerzeugung bereits Anfang der 30-iger Jahre. Die Erwartung ist, dass Start-Ups, die neuartige Technologieansätze verfolgen, weit früher zu einer kommerziellen

Stromerzeugung gelangen. Einige Start-Ups streben eine Stromerzeugung Anfang der 30-iger Jahre an.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage: Brauchen wir ITER überhaupt noch, wenn die Stromerzeugung durch staatlich/private Start-Ups weit früher realisiert wird? Ja, auf jeden Fall. Uns ist kein Projekt bekannt, das die Herausforderungen auf absehbare Zeit so umfassend untersuchen wird wie ITER. Es geht unter anderem um eine Leistungsbilanz von $Q=10$ und um Tritium-Breeding in der Wand.

ITER hat zudem bis hierhin bereits Bahnbrechendes an Ingenieurleistungen erbracht, die für all die jetzt laufenden und noch kommenden Fusionsprojekte wichtig sein werden. Sie können von den Erfahrungen bei ITER profitieren. Damit das funktioniert, hat das ITER-Team in diesem Jahr begonnen, Daten und Erfahrungen intensiv mit Fusionsunternehmen zu teilen.

7. Sicherheit, Radioaktivität

Die Sicherheit von Fusionskraftwerken stellt ein zentrales Unterscheidungsmerkmal zur Kernspaltung dar und ist einer der wesentlichsten Vorteile dieser Technologie. Im Gegensatz zu Spaltungsreaktoren, bei denen Kettenreaktionen und Kernschmelzen theoretisch möglich sind, basiert die Sicherheit der Kernfusion auf physikalischen Prinzipien, die schwere Unfälle grundsätzlich ausschließen.

Inhärente Sicherheit – Das Fundamentalgebot, keine Kettenreaktionen möglich

Das fundamentale Prinzip der Kernfusion schließt unkontrollierte Kettenreaktionen aus. Der Fusionsprozess erfordert extrem präzise Bedingungen – Temperaturen von 100 Millionen Grad Celsius, hohe Plasmadichte und ausreichende Einschlusszeit nach dem Lawson-Kriterium. Bei kleinsten Abweichungen von diesen Parametern bricht die Fusion sofort zusammen, da die erforderliche Energiebalance nicht mehr gegeben ist. Praktische Konsequenz: Selbst bei einem Systemausfall, etwa dem Ausfall der Plasmaheizung oder der Magnetfelder, führt dies automatisch zum sofortigen Reaktionsstopp. Komplexe Notkühlsysteme wie bei Kernkraftwerken sind nicht erforderlich. Ein anschaulicher Vergleich ist ein Lagerfeuer: Sobald die Zufuhr von Holz und Sauerstoff unterbrochen wird, erlischt es von selbst – ohne Restgefahr.

Die **Sicherheit** der Kernfusion ist grundsätzlich höher als die der Kernspaltung, da ein katastrophaler Unfall mit ähnlichen Folgen wie bei Kernkraftwerken praktisch ausgeschlossen ist. Fusionsreaktoren sind **inhärent** sicher. Es können keine unkontrollierten Kettenreaktionen entstehen. Kernschmelzen sind ausgeschlossen.

Allerdings birgt die Kernfusion Risiken durch das radioaktive Tritium und die durch Neutronenstrahlung aktivierten Reaktorbauteile, die zu einer radiologischen Belastung für das Personal führen können.

Weniger radioaktiver Abfall: Die entstehenden Abfälle sind bei der Kernfusion weniger langlebig und weniger radioaktiv als die aus der Kernspaltung, da sie hauptsächlich Helium als Endprodukt hat. Nach einigen Jahrzehnten ist die Aktivität vergleichbar mit der von Kohleasche

oder von Krankenhausabfällen. Es handelt sich um schwach bis mittelradioaktivem Müll. Allerdings entsteht durch die energiereichen Neutronen, die während des Prozesses freigesetzt werden, radioaktives Material im Reaktormaterial selbst. Die Wände der Reaktionskammer werden durch schnelle Neutronen radioaktiv und müssen nach der Betriebsdauer ausgetauscht und zwischengelagert werden. Der radioaktive Brennstoff Tritium muss sicher gehandhabt und eingeschlossen werden. Die Haltbarkeit der Wände und die Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit sind noch ein Thema der Forschung.

Die Aktivität der Wände nimmt aber rasch ab. Tritium ist ein radioaktives Wasserstoff-Isotop mit einer Halbwertszeit von 12,3 Jahren. Es wird im Fusionsreaktor selbst aus Lithium-6 in sogenannten Breeder-Blanket-Modulen erzeugt (Tritium-Breeding) und ist das am wenigsten radioaktive Brennstoffelement in allen Kernreaktoren. Im Gegensatz zu Kernkraftwerken, die Tonnen angereicherten Urans speichern, beträgt die Menge im Fusionsreaktor weniger als 1 kg Tritium im Plasma plus kleine Reserven im Brennstoffkreislauf für kontinuierliche Versorgung.

Bei den meisten Fusionsreaktionen entstehen nur schwach- bis mittelradioaktive Abfälle, die nicht über einen sehr langen Zeitraum eingelagert werden müssten, sondern nur ca. 100 Jahre sicher aufzubewahren sind. Die benötigten Brennstoffe Deuterium und Lithium sind nicht radioaktiv und müssen nicht, wie bei der Spaltung, radioaktiv transportiert werden.

Tritium – Das Schlüsselement

Technische Anforderungen an das Handling von Tritium umfassen geschlossene, verlustarme Kreislaufsysteme, die Tritium sicher einschließen und rückführen. Diese Technologien wurden seit Jahrzehnten in der Fusionsforschung entwickelt und getestet. Im Notfall können die geringen Tritium-Mengen schnell dekontaminiert und auf das Kraftwerksgelände beschränkt werden. Es gibt keine Vergleichbarkeit mit Reaktorunfällen wie Tschernobyl oder Fukushima, bei denen Millionen Curie freigesetzt wurden.

Strahlenschutzzvorgaben setzen strenge Limits für Freisetzung, vergleichbar mit Kernkraftwerken. Neueste Technologien erreichen

Emissionsraten unter 1%. Das primäre Umweltrisiko – Tritium in Gewässern – wird durch geschlossene Kreisläufe minimiert und ist biologisch verdünnbar.

Neutronenaktivierung der Reaktorwände

Neutronen aus den Fusionsreaktionen aktivieren unvermeidbar Reaktorwände und Strukturen. Die Aktivität nimmt jedoch rasant ab durch exponentiellen Zerfall. Nach wenigen hundert Jahren ist sie mit der Radioaktivität von Kohlekraftwerks-Asche vergleichbar:

Material	Aktivität	Halbwertszeit
Stahl (aktiviert)	Hoch (kurzfristig)	30-60 Jahre
Nach 100 Jahren	niedrig	-
Nach 500 Jahren	vernachlässigbar	-

Fusionsabfälle sind weniger voluminös (keine langlebigen Transurane) und bestehen hauptsächlich aus schwach- bis mittelradioaktiven Materialien (ca. 1% hochaktiv vs. 50% bei Spaltung). Die Lagerdauer beträgt ~100 Jahre statt >100.000 Jahre, was oberflächliche Lagerung ermöglicht und gesellschaftlich akzeptabler ist.

Nach Abschaltung des Reaktors fällt die Radioaktivität der aktivierten Materialien exponentiell ab. Bereits nach 50 Jahren sinkt die Aktivität auf etwa 10% des Ausgangswerts. Nach 100 Jahren ist sie mit der Radioaktivität von Kohlekraftwerks-Asche vergleichbar, nach 300 Jahren vernachlässigbar.

Sicherheits-Vergleich: Spaltung vs. Fusion

Kriterium	Kernspaltung	Kernfusion
Kettenreaktion	Möglich und unkontrollierbar	Physikalisch unmöglich
Kernschmelze-Risiko	Hoch (Notkühlsysteme nötig)	Null

Größte Bedrohung	Stromausfall => Schmelze	Plasma-Verlust => Stopp
Hochradioaktive Abfälle	Ja, > 100.000 Jahre	Nein
Abfall-Lagerdauer	> 100.000 Jahre	~ 100 Jahre
Tritium im Betrieb	Nicht vorhanden	< 1 kg, wenig

8. Finanzierung, Kosten

Finanzierung

öffentliche Finanzierung

Die Finanzierungslandschaft der Kernfusionsforschung hat sich in den letzten Jahren grundlegend gewandelt. Jahrzehntelang war Fusion ausschließlich aus staatlichen Quellen finanziert. Allein die Mittel, die bisher in das zentrale, länderübergreifende Projekt ITER geflossen sind, belaufen sich auf schätzungsweise 20 Mrd. Euro. Bis zur Realisierung in 2035 sind nochmal 5 Mrd. EURO vorgesehen. Daneben werden in sehr vielen Ländern zahlreiche nationale Forschungsprojekte betrieben.

Die staatliche Förderung geht weiter. USA: 1,5 Mrd. Dollar p.a. (Die USA sind der größte Investor im öffentlichen und privaten Bereich.), Deutschland: über 5 Jahre 2 Mrd. Euro, Korea: 0,9 Mrd. Euro über 5 Jahre. Darüber hinaus investiert China viele Milliarden in die Fusionsforschung, siehe 4.1.3.

Das ITER-Projekt in Frankreich repräsentiert die bisher größte Investition: Ein Gesamtbudget von 18–22 Mrd. Euro für bisherige Aufwendungen, ergänzt um weitere 5 Mrd. Euro bis zur Fertigstellung 2035. ITER ist damit das teuerste Einzelprojekt der Fusionsforschung weltweit und demonstriert die internationale Zusammenarbeit von EU, USA, China, Japan, Korea, Indien und Russland.

Staaten erkennen Fusion als strategische Technologie für Energiesouveränität. Der geopolitische Wettbewerb – besonders USA vs. China – treibt die Volumina nach oben. Öffentliche Mittel fokussieren Grundlagenforschung, Großprojekte (ITER, DEMO) und Infrastruktur: Die staatlichen Fördermaßnahmen in den einzelnen Ländern zeigt die folgende Tabelle:

Land / Region	Fördervolumen	Fokus
USA	~ 1 Mrd. USD/Jahr	APRA-E, DOE, öffentlich-private Partnerschaften

Deutschland	> 2 Mrd. EUR bis 2029	Fusionsaktionsplan, Stellarator-Forschung
China	6,5 – 13 Mrd. USD (2023+)	Schnelle Skalierung, CFETR
Korea	~ 0,9 Mrd. USD/Jahr	100 MW Pilotkraftwerk
Japan	>1 Mrd. USD/Jahr	Moonshot-Programm, JT-60SA
Großbritannien	2,5 Mrd. GBP bis 2040	STEP-Projekt bis 2040
Frankreich / EU	5,4 Mrd. EUR 2028-2034	ITER (4 Mrd. EUR), EUROfusion-Konsortium (1,4 Mrd. EUR)

Private Kapitalisierung – Der Wendepunkt, explosives Wachstum privater Investitionen

Seit 2020 strömt massiv privates Kapital in die Fusionsforschung. Dieser Wandel markiert einen entscheidenden Wendepunkt: Die Entwicklung wird zunehmend von Marktdynamiken getrieben, statt allein von staatlichen Roadmaps bestimmt zu werden.

Kapitaltrends (2021–2024): Über 10 Mrd. Dollar private Investitionen bei +300% Wachstum. Durchschnittlich 100–500 Mio. USD pro Startup. Prognose: 80 Mrd. \$ bis 2035, 350 Mrd. \$ bis 2050 (Nuclear Business Platform).

Kapitalquellen:

- Tech-Giganten: Microsoft (Helion), Alphabet (TAE), Amazon/Bezos (General Fusion)
- Einzelinvestoren: Bill Gates (Commonwealth Fusion), Sam Altman (Helion)
- Energiekonzerne: Equinor, Eni, Chevron, Shell
- Venture Capital: Klassische Fonds und Impact Investing

Unter den Investoren sind viele bekannte vermögende private [13]: Bill Gates (Commonwealth Fusion), George Soros, Jeff Bezos (General Fusion),

Open AI-Chef Sam Altman (Helion Energy), aber auch Weltkonzerne wie Alphabet (TAE, Commonwealth Fusion), Microsoft (Helion), Equinor (Commonwealth Fusion), Eni, Chevron und Shell.

Führende private Projekte und Investitionen

Unternehmen	Technologie	Investitionen /USD	Zeithorizont Prototyp
Commonwealth Fusion	Tokamak (HTS)	2,3 Mrd.	2033 - 2035
TAE Technologies	Field-Reversed Configuration	1,3 Mrd.	2033 - 2035
Helion Energy	Pulsed, Direktstrom	1,0 Mrd.	2028+
General Fusion	Magnetisch + Kompression	0,48 Mrd.	2030er
Proxima Fusion	Stellerator (innovativ)	0,2 Mrd.	2030er
Marvel Fusion	Laserfusion (Direct Driv)	0,38 Mrd.	2030er
Focused Energy	Laserfusion, Hybrid	0,1 Mrd.	2030er
GAUSS Fusion	Stellerator	0,03	2030er

Treiber privater Investitionen:

1. Zeitkompression: Prototypen 10–15 Jahre vor ITER/DEMO
2. Kosteneinsparungen: Digitalisierung, neue Designs
3. Exit-Strategien: IPO/Übernahmen bei Erfolg
4. Technologische Diversität: Höhere Erfolgschance
5. Geopolitisches FOMO: Staaten/Tech-Konzerne konkurrieren

Unter den Investoren sind viele bekannte vermögende private Investoren (13): Bill Gates (Commonwealth Fusion), George Soros, Jeff Bezos (General Fusion), Open AI-Chef Sam Altman (Helion Energy), aber auch Weltkonzerne wie Alphabet (TAE, Commonwealth Fusion), Microsoft (Helion), Equinor (Commonwealth Fusion), Eni, Chevron und Shell.

Kosten

Die Abschätzung der Kosten für Fusionskraftwerke ist durch viele Faktoren erschwert: Realisierungszeitraum, die Unsicherheit hinsichtlich der

Konzepte, die sich letztendlich als vorteilhaft durchsetzen werden, die Wettbewerbssituation zum Zeitpunkt der Realisierung, geopolitische Entwicklungen (Kriege, Krisen), Verteuerungseffekte durch die Klimapolitik, Potentiale für Kostenreduktion.

Generell geht man davon aus, dass Fusionsreaktoren eine Leistung von 1-2 GW haben werden. Diese Kraftwerke müssen nicht nur hinsichtlich der Gestehungskosten (diejenigen Kosten, zu denen Fusionskraftwerke Strom ins Netz einspeisen) rentabel sein; vielmehr sind die Gesamtkosten entscheidend. Sie umfassen Stromgestehungskosten ebenso wie die Kosten für Speicher, Netze und Verbrauchsanlagen.

Trotz dieser gegebenen Unsicherheiten gibt es erste Abschätzungen zu den Stromgestehungskosten zukünftiger Fusionskraftwerke, die eine erste Orientierung bieten. Es wurden verschiedene Reaktordesigns von Fusionskraftwerken betrachtet:

Die Spanne der LCOE beträgt zwischen 38 bis 157 Euro pro MWh. Zum Vergleich: die aktuellen Stromkosten in Deutschland liegt zwischen 20 Euro/MWh (Industrie) und 35 Euro/MWh für private Haushalte.

Weißbuch zu den Zukunftspotenzialen neuer Nukleartechnologien der bayrischen Landesregierung [13]: Die Gestehungskosten werden für die Magnet-Einschlußtechniken auf 7,5 Euro-Cent pro kWh geschätzt, wobei darauf hingewiesen, dass darin verschiedene Kostenfaktoren nicht berücksichtigt sind, beispielsweise die Versorgung mit Tritium. Der Kostenschätzung liegt das ITER/DEMO Projekt zugrunde.

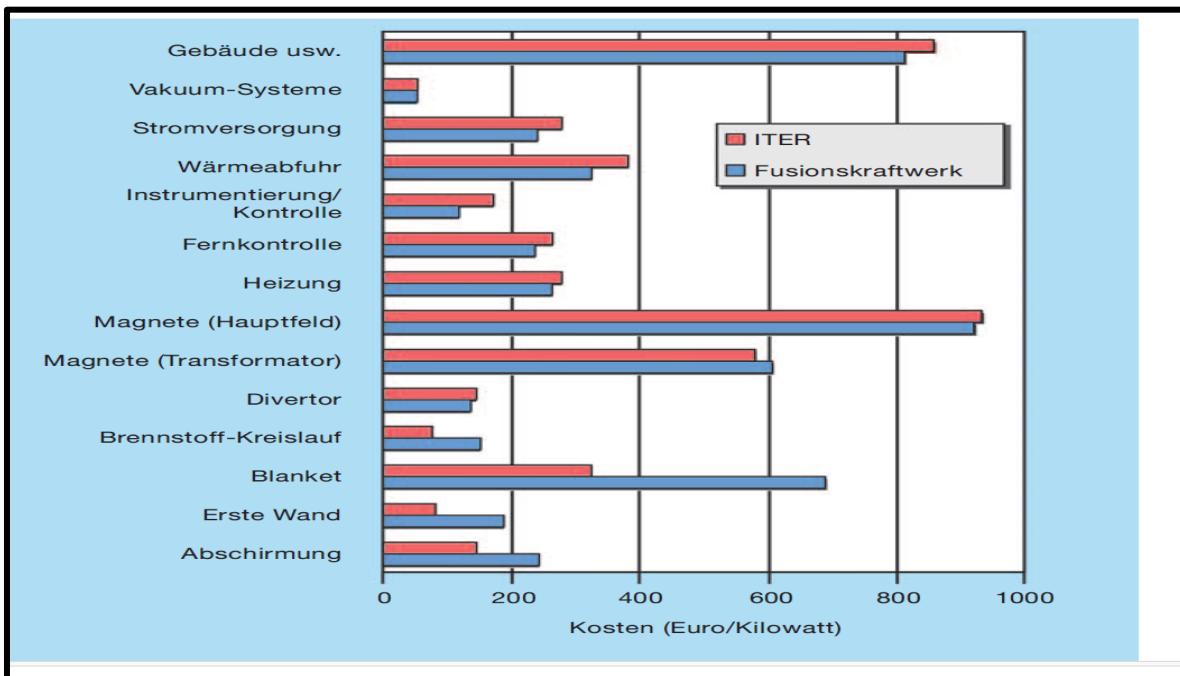
Ob sich diese Schätzwerte erreichen lassen, ist natürlich mit einer großen Unsicherheit behaftet, siehe auch [13a], Lindley et al. 2023, „Can fusion energy be cost-competitive and commercially viable? An analysis of magnetically confined reactors“. In: Energy Policy, 177, 2023.

Bei den Kosten dominieren die Kapitalkosten, wie Magnete, und Aggregate für Supraleitung. Die Kosten für Kernfusion aus Projekten mit Trägheitseinschluß werden auf 5 – 8 Euro Cent pro kWh geschätzt. Weitere Informationen zur Kostenanalyse von Kernfusion finden sich in [13a] European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy.

Zum Vergleich: der aktuelle Strompreis für Industrie liegt bei 18 Euro Cent/kWh. Darin ist das Netzentgelt ein wesentlicher Faktor.

In Abb. 21 sind die wesentlichen Investitionskosten für die Elemente eines Fusionskraftwerks erkennbar [6],

Abb. 21: Investitionskosten für die Elemente eines Fusionskraftwerks [6]



Quelle: (Quelle: Hender T.C. et al., Fusion Technology, Vol. 30, 12/1996). (Grafik: IPP)

9. Rahmenbedingungen und Chancen für Deutschland

Deutschland befindet sich in einer einzigartigen Position, um weltweit eine führende Rolle in der Kernfusionsentwicklung einzunehmen. Dieses Kapitel analysiert die bestehenden Stärken der deutschen Forschungslandschaft, die strategischen Zielsetzungen der Bundesregierung, die vorhandenen Hindernisse sowie das enorme Potenzial für technologische Souveränität und wirtschaftliche Vorteile im Fusionssektor.

Historische Stärken und aktuelle Exzellenz

Deutschland verfügt über eine hoch angesehene Forschungslandschaft in der Kernfusionsforschung, die sich durch jahrzehntelange Expertise auszeichnet. Besonders führend ist das Land bei der Stellarator-Technologie: Der Wendelstein 7-X am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching und Greifswald gilt als weltweite Referenzanlage und demonstriert stabile Plasmakontrolle im Dauerbetrieb. Ergänzt wird dies

durch umfassende Tokamak-Expertise am ASDEX-Upgrade in Garching, wo fortschrittliche Diagnostik und Plasmasteuerung entwickelt werden.

Deutsche Forscher genießen internationale Anerkennung für ihre Arbeiten zu Materialwissenschaften – insbesondere neutronenresistenten Werkstoffen – sowie zu Plasma-Wand-Wechselwirkungen, die für die Langlebigkeit von Reaktoren entscheidend sind.

Die wichtigsten Forschungsstandorte umfassen das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (Garching/Greifswald), das Forschungszentrum Jülich, das Karlsruhe Institute of Technology (KIT) sowie zahlreiche universitäre und außeruniversitäre Institute. Diese Institutionen prägen die globale Fusionsforschung und positionieren Deutschland als unverzichtbaren Partner in internationalen Projekten wie ITER.

Industrie-Ökosystem – Noch zu entwickeln

Derzeit besteht das deutsche Industrie-Ökosystem für Kernfusion aus einer kleinen Anzahl spezialisierter Unternehmen, mit begrenzter Integration zwischen Forschung und Industrie sowie einer noch nicht ausreichend entwickelten Supply-Chain für Fusionskomponenten. Positiv zu bewerten ist jedoch Deutschlands starke Tradition in Präzisionstechnik, Optik und Supraleitern. Hochleistungsunternehmen wie Siemens Energy, ThyssenKrupp, Zeiss, Schott und Bruker stehen bereit und könnten schnell mobilisiert werden. Die Herausforderung besteht darin, diese bestehenden Kompetenzen gezielt für die Fusionsindustrie zu bündeln und zu skalieren.

Deutsche Fusionsstrategie – Der Fusionsaktionsplan der Bundesregierung (2024–2029), siehe auch Kapitel 4.2

Der Fusionsaktionsplan der Bundesregierung, der 2024 beschlossen und 2025 weiter konkretisiert wurde, markiert einen ambitionierten strategischen Vorstoß. Das übergeordnete Ziel lautet: Der Bau des weltweit ersten kommerziellen Fusionskraftwerks in Deutschland. Bis 2029 sollen hierfür mehr als 2 Mrd. Euro pro Jahr bereitgestellt werden, mit einem Zeitrahmen für einen Prototyp-Demonstrator bis 2040–2045.

Kernziele der Strategie (siehe Kapitel 4.2)

Die Strategie verfolgt fünf zentrale Ziele:

1. Die Bewahrung technischer Exzellenz durch eine Führungsrolle bei Stellarator- und Tokamak-Technologien.
2. Die Förderung privater Innovation durch den Aufbau eines Startup-Ökosystems.
3. Die Vorbereitung der Industrialisierung inklusive Supply-Chain-Aufbau.
4. Die Sicherung technologischer Souveränität, um Abhängigkeiten von anderen Ländern zu minimieren.
5. Die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit durch Streben nach Kostenführerschaft.

Deutschlands Industrielle Aktivitäten

Private Fusionsunternehmen in Deutschland

Deutschland hat ein dynamisches Startup-Ökosystem hervorgebracht. Bei Tokamak- und alternativen Konzepten arbeiten Proxima Fusion (Berlin) an innovativen Stellarator-Geometrien und GAU Fusion (Dresden) an Stellarator-Varianten. Im Bereich Laserfusion entwickelt Focused Energy (München/Planegg) Direct-Drive-Systeme, während Marvel Fusion (Berlin) ultrakurze Laserpulse einsetzt.

Wichtige Technologie-Partner sind Siemens Energy (Kraftwerksintegration, Turbinen), Framatome (Kerntechnik und Sicherheit), Zeiss (Hochpräzisions-Optiken), Schott (Spezialgläser), Bruker (Supraleiter) und Trumpf (Lasertechnologie). Diese Kooperationen verbinden Startups mit etablierter Industrie.

Organisationen & Verbände

Pro-Fusion e.V., gegründet im Juni 2024, agiert als Industrieverband und vertritt gemeinsame Interessen. Zu den Mitgliedern zählen Bilfinger Nuclear Energy Transition, Focused Energy, Framatome, Marvel Fusion, Proxima Fusion und Siemens Energy. Das Verband zielt auf politische Lobbyarbeit, Standardisierung und Wissensaustausch ab.

Chancen für Deutschland

Technologische Chancen

Deutschland kann seine Stellarator-Führerschaft ausbauen: Der Wendelstein 7-X ist das weltweit einzige erfolgreiche Großprojekt dieser Art,

mit Potenzial für kontinuierliche Geometrie-Optimierung und klaren Kommerzialisierungspfaden. Der First-Mover-Vorteil durch den geplanten ersten kommerziellen Reaktor erlaubt frühes Industrie-Lernen und Fachkräfteentwicklung. Spillover-Effekte umfassen Fortschritte in Hochtemperatur-Supraleitern, digitaler Simulation/KI, Materialwissenschaften sowie Vakuum- und Präzisionstechnik.

Wirtschaftliche Chancen

Der globale Fusionsmarkt wird bis 2050 auf 80–100 Mrd. USD geschätzt; Deutschland könnte 10–20% Marktanteil erobern (8–20 Mrd. USD). Direkt entstünden 10.000–50.000 Arbeitsplätze in Forschung, Entwicklung und Fertigung, indirekt weitere 50.000 in der Supply-Chain. Das Exportpotenzial für Komponenten, Lizenzen und Know-how sichert langfristige wirtschaftliche Führerschaft.

Strategische & Geopolitische Chancen

Fusion stärkt die Unabhängigkeit in der Energieversorgung: Deuterium aus Meerwasser und Lithium-Recycling reduzieren Importabhängigkeiten. Technologische Souveränität schützt vor Abhängigkeiten von USA, China oder Japan. Langfristig (ab 2070) ergänzt Fusion Erneuerbare und trägt zu Klimazielen bei.

Hindernisse und Herausforderungen

Technische Herausforderungen

Offene Fragen umfassen Plasma-Stabilität (Tokamak-Instabilitäten), den Tritium-Kreislauf (noch nicht kommerziell demonstriert), Materialstandzeiten unter Neutronenbeschuss und Skalierungsrisiken bei der Umsetzung von Labor zu Giga-Watt-Anlagen.

Finanzielle Herausforderungen

Hohe Kapitalinvestitionen (10–50 Mrd. EURO pro Demonstrator) und lange Amortisation (50+ Jahre) erschweren Finanzierung; private Investoren bevorzugen kürzere ROI-Pfade wie Erneuerbare.

Regulatorische Herausforderungen

Das Atomgesetz ist auf Spaltung ausgelegt und erfordert Modernisierung; Genehmigungen dauern zu lange. Gesellschaftliche Skepsis verwechselt

Fusion mit Spaltung – transparente Kommunikation ist essenziell. Der Fachkräftemangel wird durch "Brain Drain" verschärft.

Industrielle Herausforderungen

Eine fragmentierte Landschaft mit kleinen Unternehmen fehlt kritische Masse; der Rückzug aus der Kernenergie schuf Kompetenzlücken in Personal und Infrastruktur.

Vergleich der Wettbewerbsländer

Aspekt	Deutschland	USA	China	GB
Forschungs-Exzellenz	★★★★★	★★★★★	★★★★	★★★★
Industrie-Readiness	★★☆	★★★★	★★★	★★★
Finanzierung pro Jahr	200+ Mio. EUR	1.500 Mio. USD	1.300+ Mio. USD	200+ Mio. GBP
Ambient Target	2045 Demo	2040 Pilot	2030 Kommerz.	2040 STEP
Startup-Dynamik	Wachsend	Sehr hoch	Hoch	Hoch
Regulatory Speed	Langsam	Schnell	Schnell	Schnell

Deutschlands Position: Forschungsführer, aber Rückstand in Industrialisierung.

Empfehlungen für Deutschland

Kurzfristig (2025–2029)

Die Finanzierung des 2-Mrd.-Aktionsplans konsequent umsetzen, Genehmigungen beschleunigen durch Modernisierung des Atomgesetzes, Fachkräfteprogramme ausbauen und Supply-Chain-Partner mobilisieren. Standortkonzepte für Demo-Anlagen evaluieren.

Mittelfristig (2030–2040)

Eine Pilotanlage bauen, private Skalierung durch Steuererleichterungen oder Public Private Partnerships fördern, USA/UK-Kooperationen vertiefen und Exportstrategien entwickeln. Fusion strategisch in der Energiepolitik verankern.

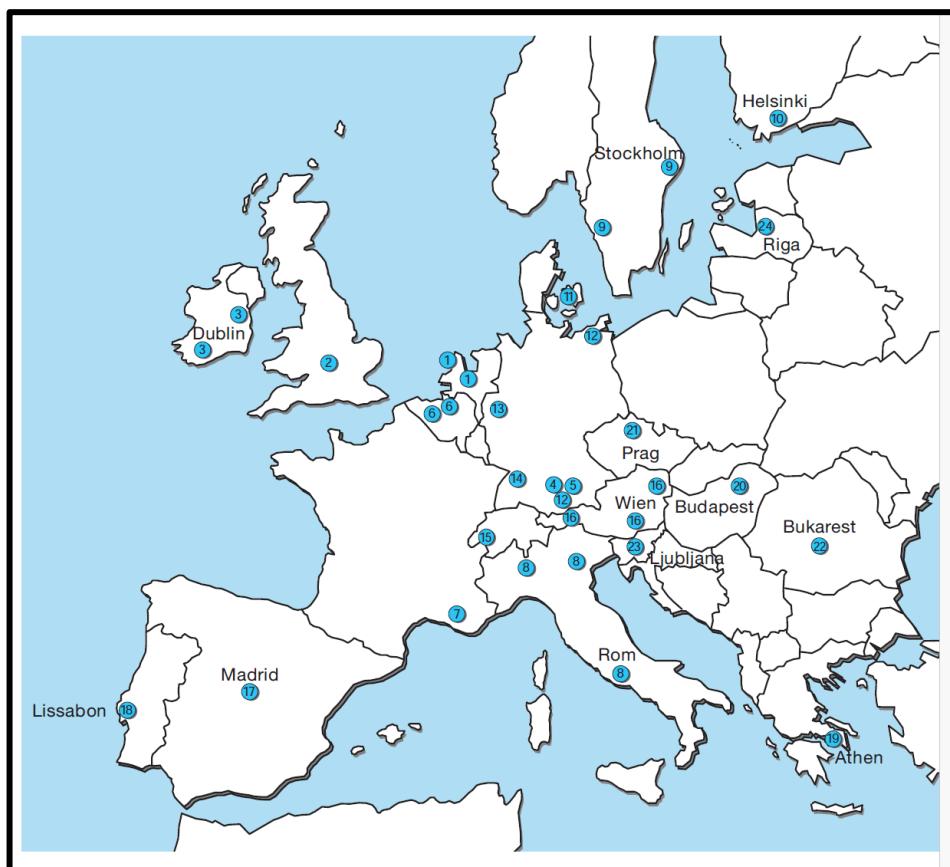
Standorte

Die Forschung an Kernfusion in Deutschland befindet sich auf einem weltweiten Spitzenniveau. Sie ist auf viele Standorte verteilt (Abb. 23) [6] :

- Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Teilinstitut Greifswald (Nr. 4 und Nr. 12 in der Karte)
- Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, Greifswald (Nr. 13 in der Karte)
- Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (Nr. 14 in der Karte)

Siehe auch die Vielzahl der europäischen Forschungsstandorte

Abb. 23: Fusionslaboratorien in Deutschland und Europa [6, S 49],



Quelle: Fusionslaboratorien in Europa (Grafik: IPP)

Fazit Kapitel 9

Deutschland vereint exzellente Forschung (Weltspitze Stellarator/Tokamak), ambitionierte Strategie (2 Mrd. EURO bis 2029) und wachsendes Ökosystem. Regulatorische Hürden und Industrialisierungs-Rückstände müssen überwunden werden.

Gesamtbewertung: Die Chance zur Fusionsführerschaft besteht – durch Einhaltung von Finanzierungszusagen, Abbau regulatorischer Hemmnisse, Fachkräfteaufbau und Industrieunterstützung. Erfolgsszenario: 2045–2050 erstes Fusionskraftwerk → Technologieführerschaft, Jobs, Souveränität.

Im Koalitionsvertrag der Regierung CDU/CSU/SPD vom Mai 2025 heißt es: Wir wollen die Fusionsforschung stärker fördern. Unser Ziel ist: Der erste Fusionsreaktor der Welt soll in Deutschland stehen. Dieses ambitionierte Bekenntnis verspricht eine rasche und gezielte Umsetzung der Ziele zur Kernfusion in Deutschland, wie sie im Positionspapier des BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (1) zur Fusionsforschung dargelegt sind. Durch den Aktionsplan der Bundesregierung wird diese ambitionierte Zielsetzung nochmals unterstrichen.

Das Ziel des BMBF ist es, möglichst schnell und zielführend die Voraussetzungen für den Bau und Betrieb von Fusionskraftwerken zu schaffen. Dazu braucht es zunächst und vor allem umfangreiche Forschungsaktivitäten. Dabei werden technologieoffen beide Ansätze – sowohl die Trägheitsfusion als auch die des magnetischen Einschlusses – verfolgt. Siehe dazu Kapitel 4.2 Deutschland.

Das BMBF wird mit dem geplanten Förderprogramm und weiteren Maßnahmen die zentralen Handlungsfelder technologieoffen angehen, die deutschen Akteure in Industrie und Wissenschaft unterstützen und vernetzen. So werden die Voraussetzungen für die Nutzung der Fusion als künftige CO₂-neutrale Energiequelle geschaffen.

Mit dem Rückzug aus der konventionellen Kernenergie gehen in Deutschland leider auch für die Kernfusion relevante Expertise und personelle Ressourcen verloren. (S. 4.2 Deutschland) Dieses ist beim Aufbau einer Kernfusions-Infrastruktur zu berücksichtigen. Vielleicht kann mit einem Einstieg in die Small Modular Reactor (SMR)-Technologie ein Teil dieser Kompetenzen wieder aufgebaut werden [4].

Deutschland hat eine hervorragende Infrastruktur für das Betreiben der Kernfusion. In der deutschen Firmenlandschaft sind schon heute verschiedene Firmen mit spezifischen Technologien involviert, die zu Schlüsseltechniken weiterentwickelt werden können und die

Wettbewerbsfähigkeit im High-Tech-Bereich entscheidend verbessern können:

10. Zusammenfassung und Ausblick

Aktuelle Relevanz und langfristiges Potenzial

Die kommerzielle Realisierung von Fusionskraftwerken liegt realistischerweise erst nach 2045, weshalb Kernfusion für die unmittelbare Energiewende und die Klimaziele bis 2030/2045 derzeit nur eine untergeordnete Rolle spielt. Dennoch bietet sie ein quasi unbegrenztes Potenzial für CO₂-freie, wetterunabhängige Grundlaststromerzeugung mit quasi unerschöpflichen Brennstoffen: Deuterium lässt sich aus Meerwasser gewinnen, Tritium wird im Reaktor aus Lithium selbst erzeugt. Im Vergleich zu volatilen Erneuerbaren Energien vereint Fusion höchste Energiedichte mit minimalen Sicherheitsrisiken, geringer Radioaktivität und kurzlebigen Abfällen, die nur etwa 100 Jahre gelagert werden müssen.

Historische Analogien: Langfristige Transformationen

Kernfusion ist ein langfristiges Projekt mit enormem Zukunftspotenzial, vergleichbar mit Technologien, die vor rund 100 Jahren entdeckt wurden und deren volle Wirkung sich erst im Laufe der Jahrzehnte entfaltete.

Kernspaltung (1938): Trotz anfänglicher Skepsis durch militärische Anwendungen, Unfälle und Abfallprobleme erlebt sie eine Renaissance. SMR [4] versprechen neue Anwendungen, insbesondere für KI-Rechenzentren und digitale Infrastruktur. Die IEA prognostiziert für die Kernenergie einen Marktanteil von 9 – 10 % an der globalen Primärenergie bis 2030, eine Verdopplung gegenüber heute.

Quantenmechanik (1925): Die Entdeckung wirkte zunächst wie eine abstrakte Erweiterung des physikalischen Verständnisses. Heute bildet sie die Grundlage unzähliger Anwendungen, ohne die unsere Zivilisation undenkbar wäre: Halbleiter, Computer, Software, KI, Laser, MRT, Mobilfunk, GPS und potenziell Quantencomputer mit exponentiell höherer Rechenleistung.

Ähnlich könnte Fusion transformative Effekte entfalten: Meerwasserentsalzung, Produktion grünen Wasserstoffs, Carbon Capture und stabile Stromversorgung für energieintensive Industrien sowie KI-Datenzentren.

Globale Dynamik: Beschleunigte Erfolge und Investitionen

Die Fusionsforschung gewinnt weltweit rasant an Dynamik, wie Kapitel 5 detailliert zeigt. Wissenschaftliche Meilensteine wie NIFs Q-Faktor >4 (2025), JETs 69 MJ-Rekord und EASTs 18-minütiger Plasmaeinschluss belegen den Fortschritt. Private Investitionen übersteigen 10 Mrd. USD (Gates, Altman, Microsoft), ergänzt durch öffentliche Mittel wie 1,5 Mrd. USD pro Jahr in den USA und 2 Mrd. EURO in Deutschland bis 2029. Startups wie SPARC, Helion oder Proxima Fusion setzen ambitioniertere Zeitpläne um als Großprojekte wie ITER und treiben Innovationen voran. Der Forschungsaufwand bleibt überschaubar und wird zunehmend privat mitfinanziert, was die Entwicklung beschleunigt.

Deutschlands einzigartige Position

Deutschland ist von Anfang an führend positioniert und nutzt seine technologischen Stärken konsequent. Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik betreibt mit Wendelstein 7-X den weltbesten Stellarator, ergänzt durch Tokamak-Forschung (ASDEX-Upgrade) und Expertise in Materialwissenschaften. Der Fusionsaktionsplan der Bundesregierung (Oktober 2025) mobilisiert über 2 Mrd. EURO bis 2029, mit dem expliziten Ziel: „Der erste Fusionsreaktor der Welt soll in Deutschland stehen“. Ein wachsendes Startup-Ökosystem – Proxima Fusion, GAUSS Fusion, Focused Energy, Marvel Fusion – verbindet sich in Pro-Fusion e.V. mit Industriepartnern wie Siemens Energy, Zeiss und Trumpf.

Im Kontrast zum Ausstieg aus der Kernspaltung ermöglicht Fusion den Wiedereinstieg in die globale technologische Spitze – ohne vergleichbare Risiken und mit möglicher gesellschaftlicher Akzeptanz.

Konkrete Handlungsempfehlungen

Kurzfristig (2025–2029): Den Fusionsaktionsplan konsequent umsetzen, inklusive Finanzierung von 2 Mrd. EURO für Forschungsinfrastruktur und Wissenstransfer. Das Atomgesetz modernisieren, um Genehmigungsverfahren zu beschleunigen. Ausbildungsprogramme an Universitäten und Forschungseinrichtungen ausbauen, um Fachkräftemangel zu bekämpfen.

Mittelfristig (2030–2040): Eine Pilotanlage errichten, um Netzkompatibilität und Wirtschaftlichkeit zu demonstrieren. Öffentlich-private Partnerschaften (PPP) stärken und internationale Kooperationen mit USA und UK vertiefen. Eine Exportstrategie für Komponenten und Know-how entwickeln.

Fazit: Strategische Priorität für Deutschland

Kernfusion transformiert sich vom „ewigen Versprechen“ zur realistischen Option für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts. Deutschland vereint einzigartige Voraussetzungen: Weltspitzenforschung, ambitionierte Politik und ein wachsendes Industrie-Ökosystem. Erfolge könnten technologische Führerschaft, 10–20 Mrd. USD Marktanteil und Tausende hochqualifizierte Jobs sichern – ergänzt um langfristige Energiesouveränität.

Kernbotschaft: Fusion als strategischen Baustein in der Energiepolitik verankern – komplementär zu Erneuerbaren. Die nächsten 10 Jahre entscheiden über Deutschlands Rolle im globalen Wettlauf; ein verstärktes Engagement lohnt sich jetzt.

Quellen

- [1] IEA (International Energy Agency), World Energy Outlook 2024; www.bpb.de/kurz-knapp/zahlen-und-fakten/globalisierung/52741/primaerenergie-versorgung/
- [2] Positionspapier Fusionsforschung, BMBF
- [3] Small Modular Reactor (SMR): Vorstellung aktueller Projekte und des jeweiligen Status, Manfred Schroeder, Bernhard Leidinger, Global Energy Solutions
- [4] Deutschland auf dem Weg zum Fusionskraftwerk. Aktionsplan der Bundesregierung
- [4a] Positionspapier Fusionsforschung, Auf dem Weg zur Energieversorgung von morgen
- [5] Acatec, Kernfusion als Baustein einer klimaneutralen Energieversorgung: https://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/PDFs/ESYS_Impuls_Kernfusion.pdf
- [6] Kernfusion Helmholtz Gemeinschaft
- [7] Techmax 09, die Sonne im Tank, Max Planck Gesellschaft
- [8] IDTechEx. (www.idtechex.com/de/research-report/fusion-energy-market/1094)
- [9] IAEA world fusion outlook 2024 und 2025
- [9a] www.innovationnewsnetwork.com/gauss-fusion-presents-europes-first-full-design-for-a-commercial-fusion-power-plant/62378/
- [9b] www.all-electronics.de/elektronik-entwicklung/energie-der-zukunft-helions-fusionstechnik-in-aktion/782344
- [10] Nature | Vol 599 | 18 November 2021
- [11] www.wsj.com/podcasts/tech-news-briefing/the-us-and-china-are-in-a-race-to-develop-energys-holy-grail/7bc45bf6-2ce1-4132-aba6-b537a393ea4c
- [12] MPI für Plasmaphysik

[13] Weissbuch: Novel Nuclear Technologies Towards a Greenhouse Gas-Free Basic Energy Supply

[13a] Lindley et al. 2023, „Can fusion energy be cost-competitive and commercially viable? An analysis of magnetically confined reactors“. In: Energy Policy, 177, 2023.

[13b] European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy

[14] Focused Energy: The roadmap of Focused Energy to inertial fusion energy; www.asso-alp.fr/wp-content/uploads/2023/07/2.7-Roadmap-of-Focused-Energy-Vaisseau.pdf