



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Positionspapier Fusionsforschung

Auf dem Weg zur Energieversorgung von morgen



Titelbild: Blick in das Plasmagefäß der Fusionsanlage Wendelstein 7-X. Zur Visualisierung eines Teils des komplexen Magnetfeldes wurde ein Elektronenstrahl längs einer magnetischen Feldlinie in Umlauf gebracht. Auf seinem vielfachen Umlauf längs der Feldlinie erzeugt er eine Leuchtspur. Das Foto kombiniert diese Leuchtspur mit den Bildpunkten, die der Elektronenstrahl auf einem fluoreszierenden Stab hinterlässt, der durch die Bildebene geschwenkt wird.

Inhaltsverzeichnis

Executive Summary	2
<hr/>	
1. Hoffnungsträger Fusionsenergie	4
<hr/>	
2. Wissenschaftliche und technologische Ausgangslage	8
<hr/>	
2.1 Magnetfusion.....	8
2.2 Trägheitsfusion.....	11
<hr/>	
3. Der Weg zu einem Fusionskraftwerk	16
<hr/>	
4. Handlungsfelder	20
<hr/>	
4.1 Magnetfusion.....	20
4.2 Trägheitsfusion.....	21
4.3 Querschnittsthemen.....	22
<hr/>	
5. Ausblick und Maßnahmen des BMBF	24
<hr/>	
Impressum	29



Executive Summary

Der Klimawandel und der weltweit rasant steigende Energiebedarf zeigen sehr deutlich, dass die Menschheit auf Energiequellen angewiesen ist, die sauberen Strom in großem Maß produzieren können. Ein vielversprechender Lösungsansatz ist die Fusionsenergie. International ist der Wettbewerb um das erste wirtschaftliche Fusionskraftwerk bereits in vollem Gange. Das weltweit gestiegene private und staatliche Engagement sowie die jüngsten Durchbrüche in der Forschung steigern auch die öffentliche Aufmerksamkeit für diese vielversprechende Technologie und befeuern die Anstrengungen auf dem Weg zu einem funktionstüchtigen Kraftwerk.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat bereits Anfang 2022 erste Schritte eingeleitet, um sich mit Blick auf die zunehmende Dynamik zu positionieren und die Möglichkeit der Ausweitung seiner Förderaktivitäten im Bereich der Fusionsforschung auszuloten. Deutschland gehört im Bereich der „Magnetfusion“ bereits heute zu den führenden Akteuren weltweit. Im Bereich der „Trägheitsfusion“ gibt es in Deutschland sowie in ganz Europa noch vergleichsweise wenige Aktivitäten. Um dieses Feld näher zu beleuchten

und insbesondere die deutschen Potenziale herauszuarbeiten, hat das BMBF Ende 2022 eine internationale Expertenkommission mit einer Analyse und der Erstellung entsprechender Empfehlungen beauftragt. Die Ergebnisse sind in einem **Memorandum** mit dem Titel „Laser Inertial Fusion Energy“ festgehalten, das am 22. Mai 2023 an die Bundesforschungsministerin übergeben wurde.

Das BMBF-Positionspapier zur Fusion umreißt Handlungsfelder und mögliche, strategisch ausgerichtete Maßnahmen in der Magnet- und Laserfusionsforschung, die Grundlage für ein zu erarbeitendes neues Förderprogramm des BMBF bilden sollen. Wesentliches Ziel der Maßnahmen ist die Beschleunigung der Technologieentwicklung hin zu einem Fusionskraftwerk.

Anschließend an die Veröffentlichung dieses Papiers ist ein **Konsultationsprozess** mit der deutschen Fusions-Community (Wissenschaft und Industrie) geplant, sodass Stellungnahmen aus der Community bei der Erstellung eines künftigen Förderprogramms des BMBF berücksichtigt werden können.

Handlungsfelder

Die skizzierten Maßnahmen lassen sich in **zwei Stränge** einordnen. Adressiert wird zum einen die konsequente Weiterentwicklung der technologischen Ansätze und zum anderen der **Aufbau eines Fusionsökosystems**. Diese Stränge sind eng miteinander verwoben:

Bei der **Weiterentwicklung der technologischen Ansätze** soll der Reifegrad der benötigten Technologien unter Einbindung der Industrie (z. B. durch Verbundforschungsprojekte) gezielt gesteigert werden. Um Forschungs- und Entwicklungsbedarfe zu ermitteln, müssen Chancen und Risiken der einzelnen Ansätze technologieoffen kontinuierlich evaluiert und mithilfe von ganzheitlichen Systemstudien einer Gesamtbewertung unterzogen werden. Dabei gilt es, die vorhandenen Stärken Deutschlands auszubauen und Synergien mit anderen Wissenschafts- und Industriezweigen zu nutzen. Das in der Magnetfusion und insbesondere beim Stellarator bereits umfangreich vorhandene Know-how soll weiter ausgebaut werden. Im Bereich der Laserfusion, einer Variante innerhalb der Trägheitsfusion, besitzt Deutschland vor allem in Hinblick auf essenzielle Systemkomponenten Kompetenzen, die weltweit von Bedeutung sind. Dieses Potenzial gilt es zu bündeln und zielgerichtet weiterzuentwickeln.

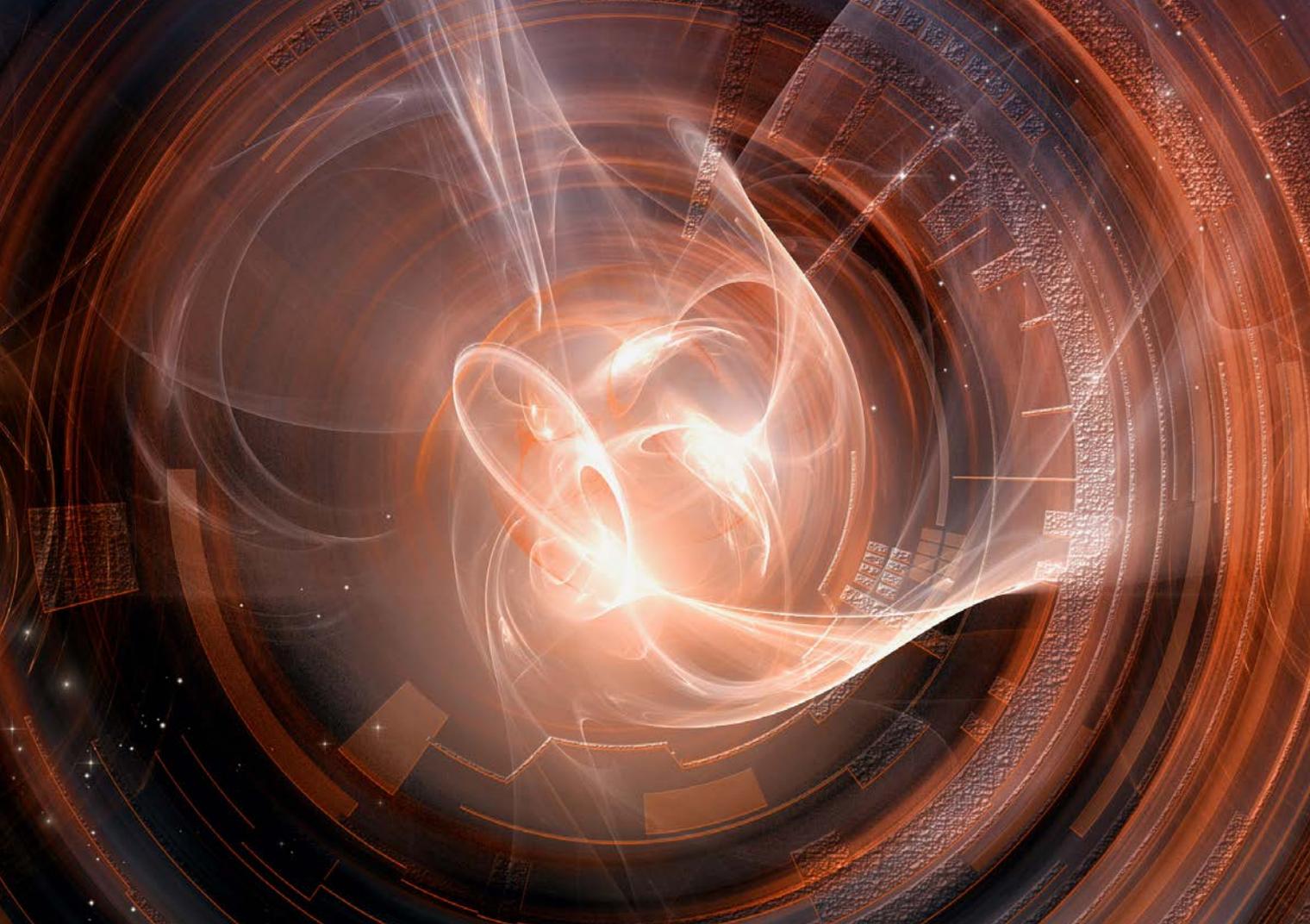
Um das zuvor genannte Ziel zu erreichen, bedarf es des **Aufbaus eines Fusionsökosystems**. Zur Nutzung von Synergien zwischen den bestehenden Zentren und zur Stärkung des Technologietransfers sollen zu einzelnen

Technologien Hubs geschaffen werden, die auch für die Industrie zugänglich sind und als Testeinrichtung genutzt werden können. Hierdurch soll die Aus- und Weiterbildung hoch qualifizierten Fachpersonals gefördert und die Vernetzung nationaler und im Rahmen entsprechender Kooperationen auch internationaler Akteure ermöglicht werden. Wichtiger Teil der Hubs sind die Lehrstühle und Institute mit ihren Infrastrukturen.

Von wesentlicher Bedeutung für die künftige Nutzung der Fusionsenergie ist der Dialog mit der Öffentlichkeit sowie eine offene und sachliche Diskussion über Chancen und Risiken der Fusionsenergie.

Für den Bau und Betrieb von Fusionskraftwerken bedarf es gleichzeitig adäquater rechtlicher Rahmenbedingungen. Das BMBF wird sich innerhalb der Bundesregierung dafür einsetzen, diese außerhalb des Atomrechts frühzeitig zu entwickeln.

Deutschland hat die Chance, bei der Realisierung der Zukunftsenergie Fusion eine führende Rolle einzunehmen. Die Ausgangslage ist exzellent; auf dem Weg hin zur Energieproduktion mittels Fusion gibt es aber noch große Herausforderungen, die nur in enger Zusammenarbeit von Politik, Wissenschaft und Industrie gemeistert werden können. Das vorliegende Positionspapier Fusion soll Orientierungshilfe und Diskussionsgrundlage auf diesem Weg sein und den Grundstein für ein nationales technologieoffenes Programm zur Förderung der Magnet- und Laserfusion legen.



1. Hoffnungsträger Fusionsenergie

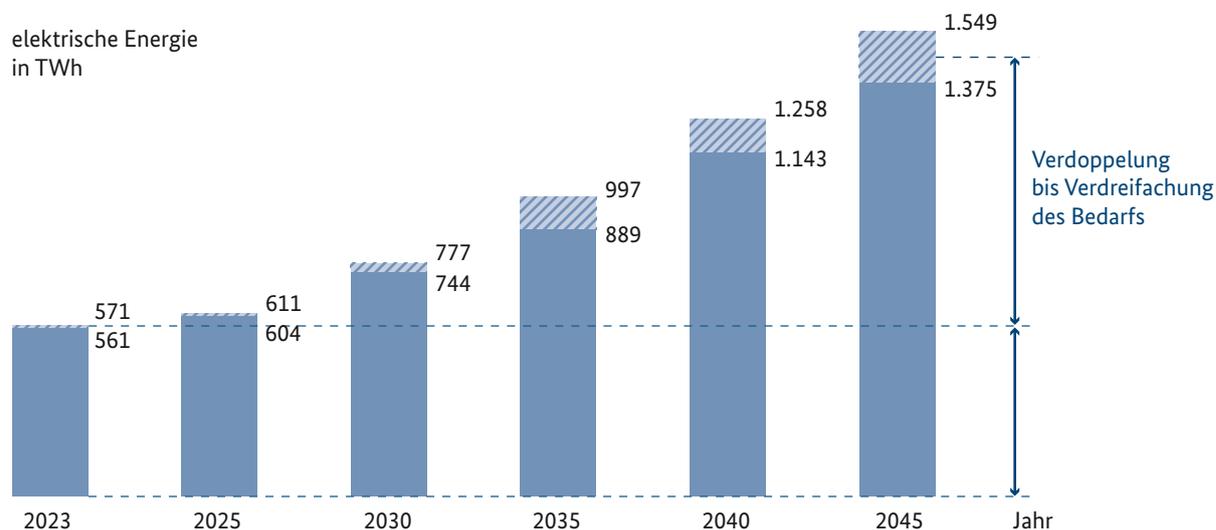
Fusion als Zukunftstechnologie für eine CO₂-neutrale Energiequelle

Die Menschheit steht vor großen Herausforderungen. Während jüngste Studien belegen, dass der Energiebedarf weltweit steigt und weiterhin steigen wird,¹ wird insbesondere von einer starken Erhöhung des Bedarfs an elektrischer Energie von mindestens einem Faktor zwei bis drei bis zum Jahr 2050 ausgegangen.² Zudem weisen Klimaforschende seit Jahrzehnten auf die dringend benötigte Energiewende hin. Fakt ist: Wir brauchen sichere, grundlastfähige, bezahlbare und CO₂-neutrale Energiequellen.

2021 betrug der Anteil grüner Energien am weltweiten Strommix nicht einmal ein Drittel.³ Ein Grund dafür ist, dass Sonne und Wind wegen schwankender Wetterbedingungen nicht immer zuverlässige Energielieferanten sind. Die kurz- und langfristige Speicherung von grünem Strom sowie die Anpassung des Stromverbrauchs an eine flexible Stromproduktion innerhalb eines digital vernetzten Energiesystems werden die Stabilität des Stromsystems wesentlich erhöhen. Dennoch können wir zum heutigen Zeitpunkt

noch nicht auf konventionelle Kraftwerke verzichten. Besonders für die Industriestaaten mit ihrem hohen Energieverbrauch wird auch zukünftig ein diversifizierter Energiesektor wichtig sein. Es bedarf mithin zusätzlicher Technologien, die grundlastfähig sind und den Strommix der Zukunft CO₂-neutral ergänzen. Dazu kann neben Strom aus erneuerbaren Quellen und grünem Wasserstoff auch die Fusion einen Beitrag leisten.

Abbildung 1: Modellierter Entwicklung des Bedarfs an elektrischer Energie in Deutschland bis 2045



Quelle: Fraunhofer ISE, Kopernikusprojekt Ariadne, ariadneprojekt.de

Lichtblick Fusionsenergie

Fusion ist die Energiequelle der Sonne und aller anderen Sterne und damit die bedeutsamste Energiequelle im Universum. Bei extrem hohen Temperaturen von 15 Millionen Grad und einem Druck von 100 Milliarden Bar verschmelzen in ihrem Zentrum zwei Wasserstoffatome zu einem Heliumatom. Die freigesetzte Bindungsenergie ist so enorm, dass sie den Energiegewinn im Vergleich mit konventionellen Verbrennungsprozessen bei Weitem überschreitet. So lässt sich aus einem Gramm Fusionsbrennstoff ungefähr so viel Energie gewinnen wie aus elf bis 13 Tonnen Öl oder Steinkohle.

Ließe sich dieser Prozess auf der Erde für die Energieproduktion in wirtschaftlicher Weise kontrolliert nachstellen, könnte auch der gesteigerte Strombedarf im Zusammenspiel mit erneuerbaren Energiequellen bedeutend einfacher gedeckt werden.

Darüber hinaus bietet die Fusionsenergie zahlreiche weitere Vorteile:

- **Fusionsenergie ist ressourcenschonend.** Potenzielle Brennstoffe sind die Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium. Diese sind aufgrund des hohen Vorkommens in der Natur (Deuterium im Meerwasser, Tritium durch Erbrütung im Fusionsprozess selbst) beinahe unbegrenzt verfügbar.
- **Fusionsenergie ist sauber.** Bei der Fusion werden keine fossilen Brennstoffe verbrannt. Der produzierte Strom wäre somit CO₂-neutral. Außerdem entstehen bei der Fusion lediglich kurzlebige und schwach radioaktive Abfälle, die keiner Endlagerung bedürfen.
- **Fusionsenergie ist sicher.** Bei der Fusion sind gefährliche, unkontrollierte Kettenreaktionen physikalisch unmöglich. Ein Betriebsausfall würde die Reaktion unmittelbar stoppen.

1 Resources for the Future. Global Energy Outlook 2022: Turning Points and Tension in the Energy Transition. April 2022; rff.org/publications/reports/global-energy-outlook-2022/

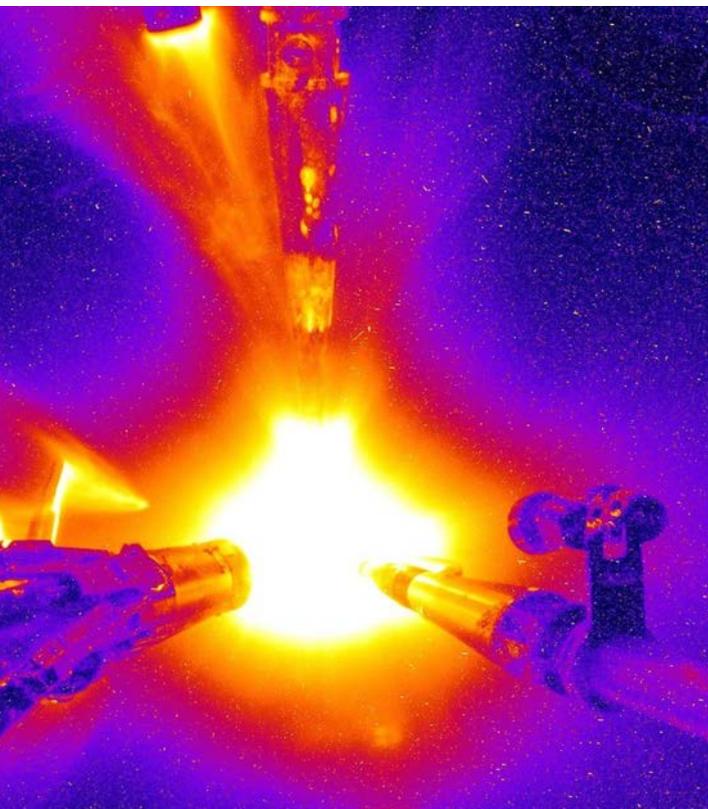
2 ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html

3 Enerdata. Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung. In: Globales Energie- und Klimastatistik-Jahrbuch 2022; energiestatistik.enerdata.net/erneuerbare-energien/erneuerbare-anteil-in-strom-produktion.html

- **Fusionsenergie ist grundlastfähig.** Anders als die volatilen Windkraft- oder Solaranlagen ist ein Fusionskraftwerk kontinuierlich in der Lage, das Stromnetz mit elektrischer Energie zu versorgen.
- **Fusionsenergie ist bezahlbar.** Die Kosten einer Kilowattstunde liegen nach derzeitigen Berechnungen in der Größenordnung von heutigem Grundlaststrom.

Fortschritte in der Fusionsforschung heizen die Debatte an

Aus technologischer Sicht ist es hoch kompliziert, Fusionsprozesse in Laboren oder Kraftwerken in Gang zu setzen. Atomkerne unterliegen aufgrund ihrer positiven elektrischen Ladung einer starken Abstoßung, zu deren Überwindung hohe Drücke und Temperaturen erforderlich sind. Eine Verschmelzung erreicht man daher nur mithilfe von extremen Magnetfeldern, Heizsystemen oder sehr starken Lasern.



Koloriertes Foto einer Deuterium-Tritium-Implosion an der National Ignition Facility (NIF)

Jüngste Fortschritte in der **Laserfusion** lassen jedoch aufhorchen. Im Dezember 2022 gelang es Forschenden der National Ignition Facility (NIF) des Lawrence Livermore National Laboratory in Kalifornien erstmalig, mehr Energie aus der Fusionsreaktion zu gewinnen (3,15 MJ), als durch die verwendeten Laserstrahlen in das Target eingestrahlt wurde (2,05 MJ). Wenngleich dies ein beachtlicher wissenschaftlicher Meilenstein in der Fusionsforschung ist, ist das Verfahren jedoch bei Weitem noch nicht für eine industrielle Anwendung in Fusionskraftwerken geeignet (s. Kapitel 2.2).

Bei der **Magnetfusion** handelt es sich um den international am weitesten fortgeschrittenen Ansatz, der zurzeit die wesentliche Rolle in Forschung und Wirtschaft spielt (s. Kapitel 2.1). Mit dem International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) wird in Frankreich derzeit die weltweit größte Anlage zur Erforschung der Magnetfusion errichtet. Deutsche Forschungseinrichtungen sind in diesem Bereich mit an der Weltspitze zu finden.

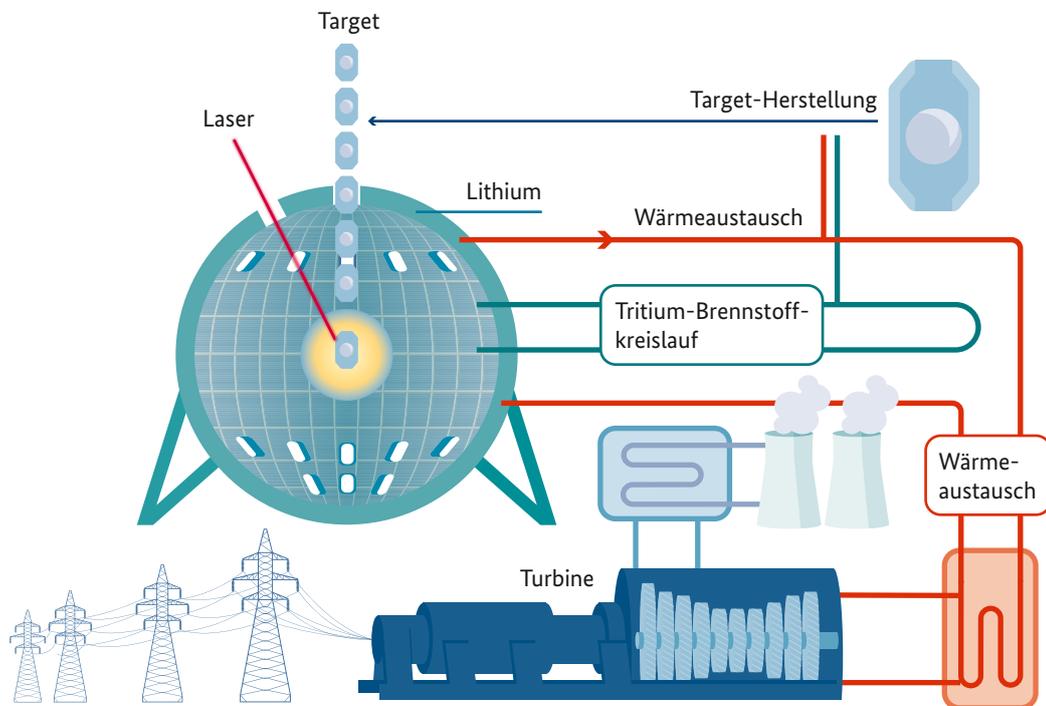
Dennoch ist nicht mit Sicherheit abzusehen, welcher Ansatz sich tatsächlich durchsetzen wird. Das **stark gestiegene private Engagement** im Bereich der Fusionsforschung zeigt jedoch, dass das internationale Wettrennen um den ersten Fusionsreaktor längst begonnen hat. Allein in den letzten zwei Jahren wuchsen die weltweiten privaten Gesamtinvestitionen um mehr als 260 Prozent auf heute über 4,8 Milliarden US-Dollar. Nur 117 Millionen US-Dollar davon stammen aus öffentlicher Hand (Stand: Juli 2022).⁴

Deutschland als Treiber der Fusionsforschung

Um den aufgezeigten gesellschaftlichen Herausforderungen zu begegnen und um die Technologie- sowie Energiesouveränität Deutschlands zu stärken, fördert das BMBF **technologieoffen** die Erforschung aller dafür geeigneten Ansätze. Neben bereits verfügbaren Technologien zur CO₂-freien Stromerzeugung (z. B. Windenergie, Wasserenergie, Solarenergie, Geothermie) stellt die Fusion einen vielversprechenden Ansatz dar, den zukünftigen Strommix als CO₂-neutrale Energiequelle zu ergänzen. Alle bekannten Ansätze – sowohl in der Magnetfusion als auch in der Trägheitsfusion – sollten daher auf ihre Eignung für die Realisierung von Fusionskraftwerken untersucht werden.

4 Fusion Industry Association. The global fusion industry in 2022; fusionindustryassociation.org/about-fusion-industry

Abbildung 2: Funktionsprinzip eines Laserfusionskraftwerks



Quelle: In Anlehnung an Lawrence Livermore National Laboratory

Deutschland besitzt in beiden Bereichen bereits vielfältige und langjährige Kompetenzen (s. Kapitel 2), hat jedoch bislang den Schwerpunkt auf die Förderung der Magnetfusion gelegt. Die Fortschritte in der Fusionsforschung geben nun Anlass zu einer systematischen Neubewertung der Lage. Noch vor den Durchbrüchen in Kalifornien hat sich das BMBF bereits im Mai 2022 mit Expertinnen und Experten aus der deutschen Wissenschaft und Industrie zu den Perspektiven der verschiedenen Fusionstechnologien ausgetauscht. In einem Fachgespräch wurden die verschiedenen Technologiepfade beleuchtet, Potenziale diskutiert sowie mögliche Hindernisse für deren Realisierung erörtert. Zudem eruierten die Teilnehmenden, was in Forschung und Wirtschaft getan werden muss, damit Deutschland für die Zukunftstechnologie Fusion gut aufgestellt ist und davon optimal profitieren kann.

In Umsetzung einer der Empfehlungen des Fachgesprächs hat das BMBF eine **internationale Expertenkommission** eingesetzt, die von Dezember 2022 bis März 2023 verschiedene Ansätze der Laserfusion analysiert, bewertet und mögliche Umsetzungskonzepte in einen Zeitplan eingeordnet hat. Die Ergebnisse der Arbeit der Expertenkommission sind in einem Memorandum mit dem Titel „Laser Inertial Fusion Energy“ festgehalten und bilden einen wertvollen Beitrag zu den strategischen Überlegungen des BMBF.



2. Wissenschaftliche und technologische Ausgangslage

Weltweit fokussiert sich die Fusionsforschung im Wesentlichen auf zwei Technologieansätze: die Magnetfusion und die Trägheitsfusion, von der die Laserfusion eine Variante darstellt.

2.1 Magnetfusion

Bei der **Magnetfusion** (MFE: „magnetic fusion energy“) ist ein Gasgemisch aus den Wasserstoffisotopen Deuterium und Tritium in einem Reaktor von einem Magnetfeld eingeschlossen, sodass es die Reaktorwände nicht berühren kann und Teilchen und Energie das Plasma nicht verlassen (sog. magnetischer Einschluss). Das eingeschlossene Plasma wird mithilfe einer sehr starken externen Heizung auf eine Tem-

peratur von mehreren Millionen Grad Celsius erhitzt, sodass ähnlich wie in der Sonne Fusionsreaktionen stattfinden können. Der **Stellarator** und der **Tokamak** stellen die zwei gängigsten Varianten eines Magnetfusionsreaktors dar.

Forschung in Deutschland, Europa und weltweit

In der Magnetfusionsforschung gehört **Deutschland** zu den führenden Nationen. Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) betreibt den Tokamak **ASDEX**

Upgrade in Garching sowie den weltweit größten und fortschrittlichsten Stellarator **Wendelstein 7-X** in Greifswald. Neben dem IPP erforschen das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und das Forschungszentrum Jülich (FZJ) ebenfalls wichtige Teilbereiche der Fusion. Herausragende und einzigartige Kompetenzen bestehen in Deutschland daher unter anderem in der Erforschung der Wechselwirkung zwischen Plasma und Reaktorwand, der Materialermüdung, der Hochfeldmagnete, des Brennstoffkreislaufs oder komplexer Reaktorkühlsysteme. Aufgrund des hohen Potenzials fördert das BMBF die nationalen Arbeiten an den genannten Institutionen derzeit mit rund 150 Millionen Euro jährlich (Stand: 2023).

Auch **Europa** ist auf globaler Ebene ein wichtiger Akteur im Bereich der Magnetfusionsforschung. In Großbritannien ist mit dem europäischen Gemeinschaftsprojekt **JET** (Joint European Torus) der weltweit größte Tokamak in Betrieb. Er dient als Testumgebung für zahlreiche Technologien und Szenarien, die nun in der internationalen Fusionsforschungsanlage **ITER** Anwendung finden, die derzeit im südfranzösischen Cadarache errichtet wird. So wie JET beruht auch ITER auf dem Tokamakprinzip und wird im Wege einer internationalen Forschungskooperation zwischen der Europäischen Union (über EURATOM), China, Indien, Japan, Südkorea, Russland und den USA finanziert und realisiert. ITER soll nachweisen, dass mit der Magnetfusion eine positive Energiebilanz



Elektronenmikroskopische Aufnahme der Bruchstelle eines Wolfram-Faserverbundwerkstoffs. Dessen Verwendung im Fusionsreaktor könnte bei den vorherrschenden Temperaturen helfen, thermische Spannungen besser abzufangen und Rissbildung zu begrenzen

erreicht werden kann. Zudem sollen mit ITER 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),

Abbildung 3: Magnetischer Einschluss



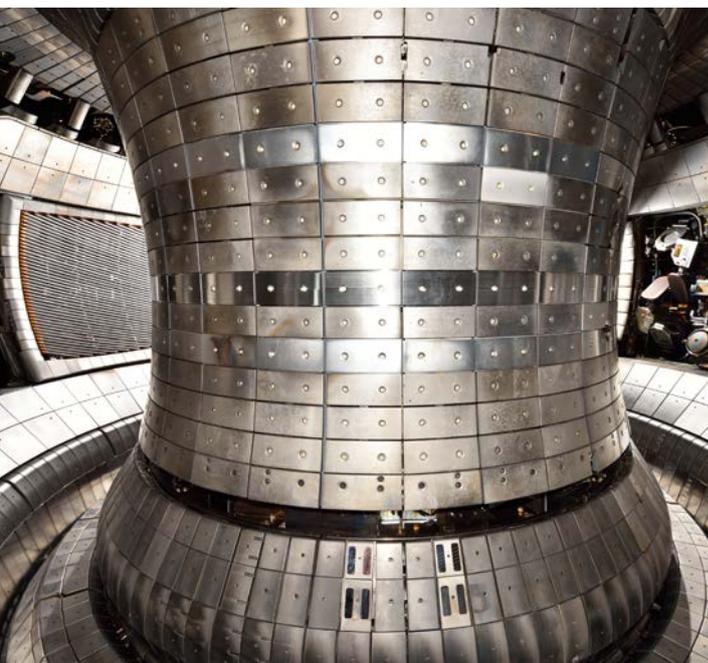
Quelle: MPI für Plasmaphysik

Prinzip des magnetischen Einschlusses: Beim Tokamak (links) wird mittels einer Zentralspule (braun) ein Strom im Plasma (violett) erzeugt, dessen Magnetfeld sich mit den Feldern weiterer Spulen zu dem benötigten verdrillten Magnetfeldkäfig zusammensetzt. Beim Stellarator (rechts) sorgen eine sehr komplexe Form und Anordnung der äußeren Spulen alleine für das verdrillte Magnetfeld.

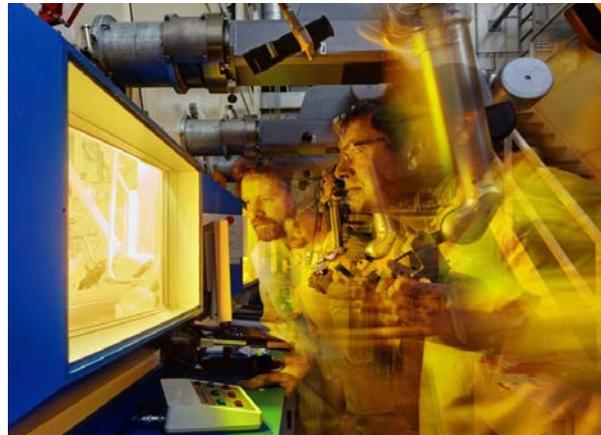
Plasmaheizung (Gyrotrons, Plasmaquelle der Neutralteilchenheizung), Magnet- und Kryomaterialien, Brennstoffkreislauf, Brut-Blanket-Konzepte, Divertor-Technologie oder Experimentsteuerung.

Neben den **USA** und **UK** ist **Frankreich** mit der CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) einer der Hauptakteure der Magnetfusionsforschung. Es betreibt das IRFM (Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique), welches aufgrund seiner herausragenden Kompetenzen im Jahr 2005 mit ausschlaggebend für die Standortauswahl von ITER war. Frankreich trägt als Sitzland neun Prozent der Gesamtkosten des ITER-Projekts, was etwa 20 Prozent der europäischen Kostenbeteiligung ausmacht.

Das europäische Konsortium **EUROfusion** (Konsortialführer IPP) wird von der EU finanziert und trägt zur Umsetzung des Forschungs- und Ausbildungsprogramms der Europäischen Atomgemeinschaft („Euratom-Programm“) bei. Grundlage ist die von EUROfusion entwickelte „European Roadmap to the Realisation of Fusion Energy“.⁵ Dabei stehen die Vorbereitung der ITER-Experimente sowie die Konzep-



Innenansicht ASDEX Upgrade



In den „Heißen Zellen“ des Fusionsmateriallabors am KIT werden Materialien für das Vakuumgefäß untersucht

tion für ein zukünftiges Fusions-Demonstrationskraftwerk DEMO im Vordergrund.

Staatliche und private Investitionen nehmen zu

Weltweit steigt das Interesse an einem Fusionsreaktor, welcher auf der Magnetfusion basiert. **China** startete vor Kurzem ein groß angelegtes nationales Aufholprogramm. In der neuen Tokamak-Anlage BEST will das Land alle benötigten Fusionstechnologien testen, um im Anschluss bis 2040 ein funktionsfähiges Kraftwerk zu bauen. In den USA wurde die Fusionsforschung zuletzt mit einer Summe von 763 Millionen US-Dollar im Jahr 2023 gefördert. Für das Jahr 2024 ist eine Erhöhung auf rund eine Milliarde US-Dollar vorgesehen. Nur 15 Millionen US-Dollar davon sind bislang für die zivile Laserfusionsforschung vorgesehen. Mit einem umfassenden nationalen Public-Private-Partnership-Programm beabsichtigen die USA, im Jahr 2024 unter anderem 135 Millionen US-Dollar in Projekte zu investieren, die darauf abzielen, bis Ende der 2030er-Jahre erste kleine Demo-Fusionskraftwerke für zivile Zwecke zu errichten.⁶

Auch die Aktivitäten im **privaten Sektor** sind beachtlich. Die Fusion Industry Association (FIA) geht in ihrem jüngsten Bericht davon aus, dass sich etwa die Hälfte aller **Fusionsunternehmen weltweit** auf Magnetfusion spezialisieren wird. Insbesondere größere Unternehmen mit Investitionen von über 200 Millionen US-Dollar verfolgen diesen Ansatz. Mit großer Mehrheit wird die Erzeugung von Elektrizität als Zielmarkt

⁵ euro-fusion.org/eurofusion/roadmap/

⁶ science.osti.gov/fes/About/FES-Budget

Abbildung 4: Hauptsitz der privaten Fusionsunternehmen weltweit



Quelle: Fusion Industry Association (Stand: April 2023)

gesehen.⁷ In Deutschland sind seit dem Jahr 2022 die deutschen Start-ups Gauss Fusion und Proxima Fusion auf dem Gebiet der Magnetfusion aktiv.



An der MEKKA-Einrichtung (Magnetohydrodynamic Experiments in NaK Karlsruhe) des KIT können Flüssigmetall-Strömungen für Fusionsanwendungen untersucht werden

2.2 Trägheitsfusion

Bei der **Trägheitsfusion** (IFE: „inertial fusion energy“) wird ein millimetergroßes Kügelchen (sog. Target) aus gefrorenem Brennstoff (in der Regel ein Deuterium-Tritium-Gemisch) mit hochintensiver Laserstrahlung in Bruchteilen einer Sekunde beschossen. Das Kügelchen erreicht dadurch das Hundertfache seiner Dichte und eine Temperatur von bis zu 120 Millionen Grad Celsius. Durch diesen stark komprimierten Zustand können Fusionsreaktionen stattfinden, bevor das Target durch die freigesetzte Energie auseinandergetrieben wird.

Im Wesentlichen unterscheidet man innerhalb der Laserfusion zwei Verfahren: indirect drive und direct drive. Beim **indirect drive** gelangen die Laserstrahlen durch kleine Öffnungen in einen Hohlkörper, in dessen Innern sich der Brennstoff befindet. Die Laserstrahlen treffen auf die Innenwand des Hohlkörpers, wobei die Laserstrahlung in Röntgenstrahlung umgewandelt und das Target gleichmäßig bestrahlt und

⁷ Fusion Industry Association. The global fusion industry in 2022; fusionindustryassociation.org/about-fusion-industry

damit erhitzt wird. Das von der Oberfläche des Brennstoffkügelchens expandierende Plasma erzeugt einen Rückstoß, wodurch der Rest konzentrisch zusammengedrückt wird. Im Zentrum der Brennstoffkugel entstehen dabei Temperaturen, die Fusionsreaktionen möglich machen. Diese Methode ist jedoch durch die Umwandlung der Strahlung mit zusätzlichen Verlusten verbunden.

Beim **direct drive** hingegen erfolgt die Kompression direkt über die Lasereinstrahlung. Der Hohlraum und die Umwandlung in Röntgenstrahlung wird vermieden. Die Brennstoffkugel ist dabei nur mit einer dünnen Schicht Glas oder Metall umhüllt. Diese Methode erfordert zwar erhöhte Präzision, ist aber deutlich energieeffizienter.

Der direct drive stellte daher lange Zeit den vielversprechenderen Ansatz für Anwendungen zur Energiegewinnung dar. Aufgrund der jeweiligen speziellen Vor- und Nachteile ist nach Expertenmeinung aber der Wettlauf beider Methoden weiterhin offen.

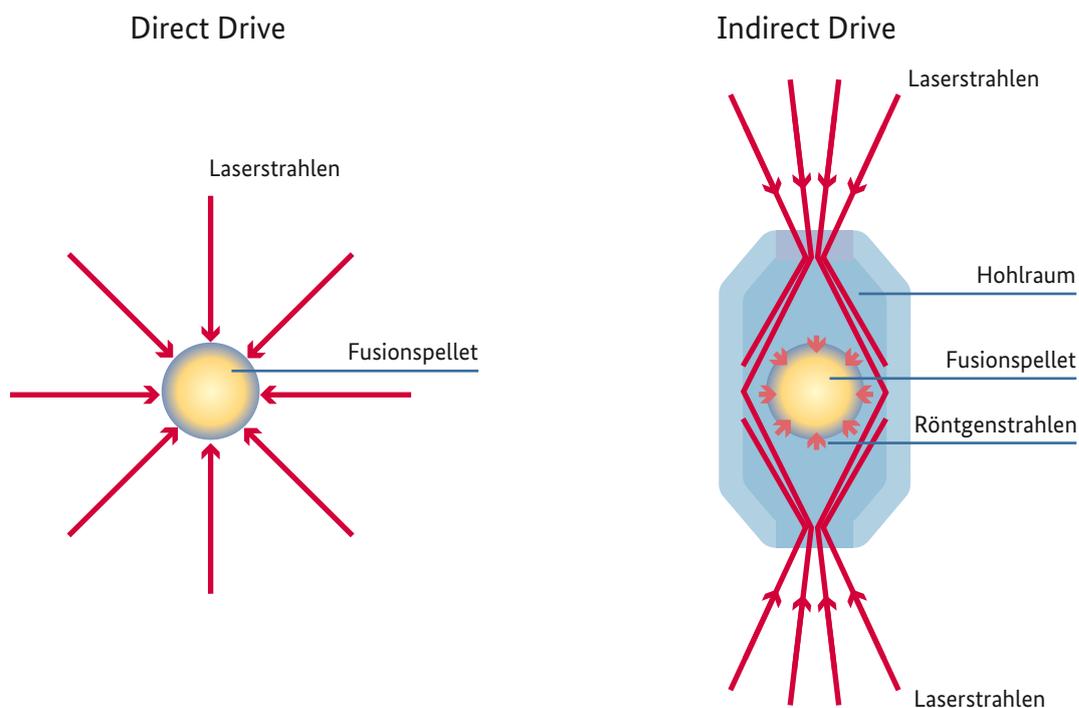
Ein Blick auf den Status quo der Forschung in Europa und der Welt

Der Großteil der Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Laserfusion ist bislang militärisch motiviert: Experimente unter Verwendung des indirect drive liefern wichtige Messdaten für die Validierung von Codes zur Untersuchung der Vorgänge in Wasserstoffbomben.

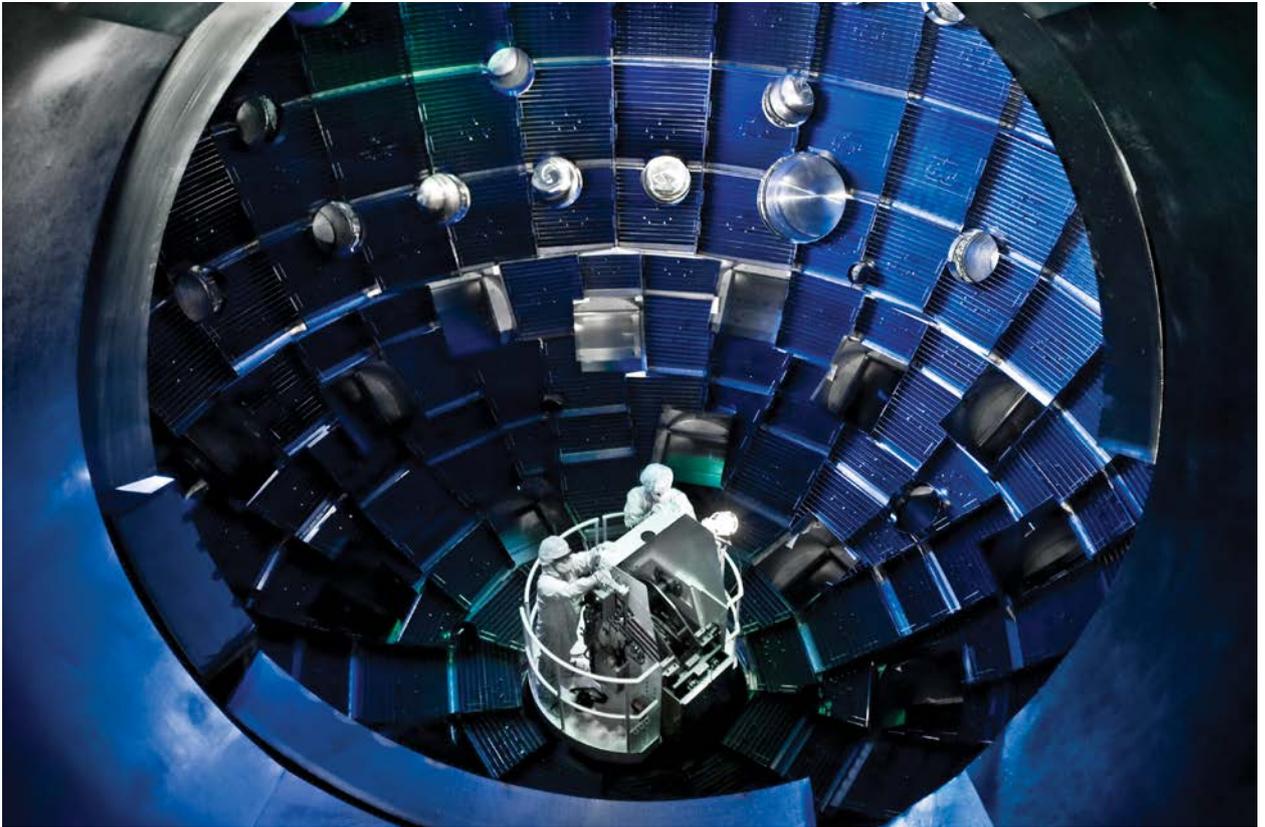
Weltweit führend auf dem Gebiet der Laserfusion sind die **USA**. Nach einer Reihe von technologischen Durchbrüchen gelang es der Forschungseinrichtung National Ignition Facility (NIF) im Dezember 2022 erstmalig, mittels des indirect drive mehr Energie aus der Fusionsreaktion zu gewinnen, als über die Laser zugeführt wurde („scientific breakeven“). Der Energiegewinn belief sich dabei auf rund 53 Prozent.

In **Europa** ist insbesondere Frankreich – ebenfalls mit einem militärischen Hintergrund – in diesem Feld aktiv. Weitere Hochenergie-Laser-Einrichtungen stehen in UK, der Tschechischen Republik und auch Deutsch-

Abbildung 5: Zündschemata für die Laserfusion



Beim direct drive (links) treffen die Laserstrahlen von allen Seiten direkt auf die Brennstoffkapsel (Pellet) und komprimieren sie möglichst gleichmäßig. Beim indirect drive (rechts) treten die Laser zunächst in einen Hohlraum ein, der sie in Röntgenstrahlung umwandelt, welche dann auf die Kapsel einwirkt und sie komprimiert.



NIF-Techniker bei Wartungsarbeiten im Innern der Targetkammer

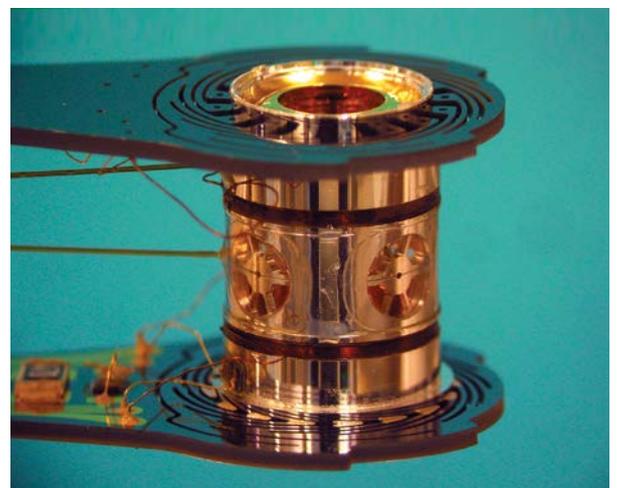
land (s. u.). Auch China, Japan und Russland treiben die Laserfusionsforschung ihrerseits voran.

Herausforderungen auf dem Weg zum Ziel

Der Erfolg an der NIF in den USA gilt zwar als herausragender Meilenstein, darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass zumindest auf dem Weg zu einem **Fusionsreaktor** mittels Laserfusion noch viele **Herausforderungen** überwunden werden müssen. Der tatsächliche Wirkungsgrad des NIF-Experiments sinkt bei genauerer Betrachtung auf unter ein Prozent, da die Laser zu ihrem Betrieb 100-mal mehr elektrische Energie benötigen, als sie in Form von Laserenergie in die Fusionskammer transportieren. Um Energie in einem Fusionsreaktor gewinnen zu können, müssen außerdem bis zu zehn Brennstoffkugeln pro Sekunde hochpräzise positioniert und gezündet werden. Die erforderliche Produktionsrate der Targets kann derzeit bei Weitem noch nicht erreicht werden. Auch beschränkt sich die Anzahl der Schüsse, die mit aktuellen Lasersystemen abgegeben werden können, auf nur ein bis zwei pro Tag.

Trägheitsfusionsforschung in Deutschland

Der Weg zu einem nutzbaren Fusionskraftwerk ist folglich noch weit. Obwohl in **Deutschland** derzeit nur wenige Aktivitäten im Bereich der Laserfusion existieren, eröffnen sich hier einige Möglichkeiten: For-



Der ca. 1 cm große metallische Hohlraum, in dessen Innern die Brennstoffkapsel für die NIF-Experimente untergebracht ist



Für die Laserfusion müssen die erforderlichen Laser mit großer Präzision justiert werden

schungseinrichtungen der Helmholtz-Gemeinschaft, der Max-Planck-Gesellschaft und der Fraunhofer-Gesellschaft hatten aufgrund ihrer thematischen Schwerpunkte in der Vergangenheit Berührungspunkte mit der laserbasierten Trägheitsfusion. Einige der Einrichtungen betreiben Laser von internationaler Bedeutung mit relevanten Parametern.⁸ Zudem gibt es einige Unternehmen, die weltführend in der **Herstellung der Targets** und in der **Entwicklung optischer Materialien und Komponenten** der Lasersysteme sind. So stammen die Kapseln für die Brennstofftargets des NIF beispielsweise von einer Ausgründung des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Festkörperphysik (IAF), und auch die weltweiten Aktivitäten sind ohne die Beiträge der deutschen Optikindustrie nicht möglich. Gegenwärtig sind es vor allem die beiden deutschen Start-ups Focused Energy und Marvel Fusion, die sich konkret der Realisierung eines **Fusionsreaktors** auf Basis der Laserfusion verschrieben haben.

Feststellungen des Memorandums „Laser Inertial Fusion Energy“

Aus den Darlegungen des Memorandums der BMBF-Expertenkommission geht hervor, dass die Laserfusion weltweit rasante Fortschritte macht und in Hinblick auf ein breiter aufgestelltes Energieportfolio akuter Handlungsbedarf für Deutschland besteht. Die Expertenkommission stuft die Aufnahme der Laserfusion in ein groß angelegtes und nachhaltiges FuE-Programm daher als essenziell ein.

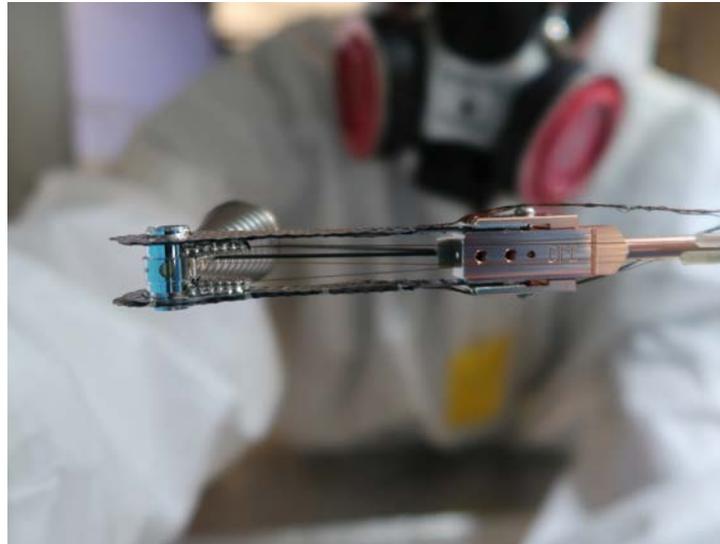
Darüber hinaus charakterisiert die Expertenkommission die gesellschaftlichen und technischen Herausforderungen als enorm: Es brauche ein breites IFE-Ökosystem, welches durch eine große Fach-Community, entsprechende Infrastruktur, geregelte Handlungsrahmen und öffentliche Aufklärung kultiviert wird. Noch fehle dieses in Deutschland. Jedoch verweist die Expertenkommission auf bereits in Deutschland existierende Infrastrukturen (vorrangig in der Magnetfusion) und auf die oben

⁸ Die Laser PHELIX am GSI Darmstadt; DRACO (und bald PENELOPE) am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR); POLARIS am Helmholtz-Institut Jena; HIBEF an XFEL/DESY.

beschriebenen bestehenden Fachkompetenzen (z. B. in Laser- und Target-Fertigung) im Bereich der Trägheitsfusion. Darauf könne man aufbauen und somit Technologie-Hubs wie auch Exzellenzzentren errichten.

Hiervon profitierten auch die Start-ups, deren Konzepte auf sehr speziellen Designs basieren und sich in Eigenregie nur langwierig, mit großem Aufwand validieren und untersuchen lassen. Zusätzlich fehle es derzeit auch noch an klaren Bewertungskriterien und Meilensteinen für eine später notwendige Eingrenzung der Ansätze. Deutschland verfüge über ausgewiesene Expertise in der Systemintegration, die sich insbesondere für internationale Kooperationen eigne. In diesem Zusammenhang wird neben den notwendigen und teils erheblichen Technologiesprüngen bis zur Realisierung eines Kraftwerks auch auf die Notwendigkeit verwiesen, prioritär ein Design für ein Laserfusionskraftwerk zu erarbeiten, das dann wiederum die Anforderungen an Entwicklungen in den relevanten Teiltechnologien definiert.

Zusätzlich sieht das Memorandum die dringende Notwendigkeit zur frühzeitigen Rekrutierung und Ausbildung entsprechenden Fachpersonals. Das betrifft sowohl den Bedarf an Forschenden aller MINT-Fächer für die frühen Phasen eines Programms als auch Ingenieurinnen und Ingenieure sowie technisches Personal für spätere Transfer- und Integrationsaktivitäten.



Ein Target mit speziellen Vorrichtungen zur Messung der Schock-eigenschaften des extrem komprimierten Deuteriums



Link zum
Memorandum Laserfusion



3. Der Weg zu einem Fusionskraftwerk Ziele, Strategien und Meilensteine

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.

Außerhalb Deutschlands sind dabei Frankreich, China und die USA die größten Mitstreiter im Wettrennen um einen kommerziellen Fusionsreaktor. Auffällig sind die **umfangreichen staatlichen Fördermaßnahmen** der Nationen, die ambitionierte Projekte sowohl in der Magnet- als auch in der Laserfusionsforschung unterstützen. Obwohl bislang nicht von einem breiten Einsatz von Fusionskraftwerken vor dem Jahr 2050 auszugehen ist, eröffnen sich durch die steigenden

Investitionen anderer Länder und privater Investoren Chancen für eine beschleunigte Realisierung. Dies verdeutlicht den Bedarf, die nationalen Stärken effektiv zu bündeln, um im internationalen Technologiewettbewerb mithalten zu können. Zur Vermeidung eines Kompetenzverlusts sowie einer Abwanderung von Fachkräften müssen Forschungseinrichtungen sowie Unternehmen in der Magnet- und Laserfusion unterstützt sowie Forschungsinfrastrukturen

bedarfsgerecht ausgebaut werden. Übergeordnetes Ziel einer solchen Förderprogrammatis muss dabei die Errichtung eines (Demonstrations-)Kraftwerks sein, mit welchem in großem Maßstab sauberer Strom erzeugt und in das Stromnetz eingespeist werden kann.

Vorausschauend agieren heißt technologieoffen agieren

Noch ist offen, welcher Technologieansatz sich für die Errichtung eines Fusionskraftwerks durchsetzen wird. Dabei geht es nicht nur um die Frage, ob Magnet- oder Trägheitsfusion der Ansatz der Zukunft sein wird, sondern auch, welche Reaktortypen und Verfahren innerhalb der verschiedenen Grundkonzepte schlussendlich zum Erfolg führen werden. Um auf dem Weg zu einem funktionsfähigen Kraftwerk den zielführendsten Ansatz zu verfolgen, ist es notwendig, technologieoffen zu agieren. Die verschiedenen Ansätze und ihre Erfolgsaussichten müssen fortlaufend neu bewertet werden. Zu diesem Ergebnis kommt auch die Expertenkommission in ihrem Memorandum zur Laserfusion. Ferner gilt es, Synergien zu verwandten Hightech-Feldern, wie Laser, Materialentwicklung oder Hochleistungsrechnern, zu erschließen. Die Entwicklungen in diesen Feldern können einerseits für die Fusion genutzt werden, andererseits bringen Ergebnisse der Fusionsforschung auch Anwendungen in diesen Feldern über die Fusion hinaus. Neben Synergien ergeben sich folglich auch Risiken, etwa mit Blick auf eine Dual-Use-Problematik, die stetig analysiert und bewertet werden müssen.

Drei Phasen zum Kraftwerk

Um ein Kraftwerk möglichst rasch realisieren zu können, müssen jetzt schnellstmöglich die erforderlichen Technologien entwickelt werden. Um die gute hiesige Ausgangslage zu nutzen und international nicht den Anschluss zu verlieren, müssen konkrete, systematische Maßnahmen zum Ausbau der nationalen Fusionsforschung ergriffen werden. Dabei gilt es, folgende Phasen zu betrachten, die nicht scharf voneinander zu trennen sind und überlappen können:

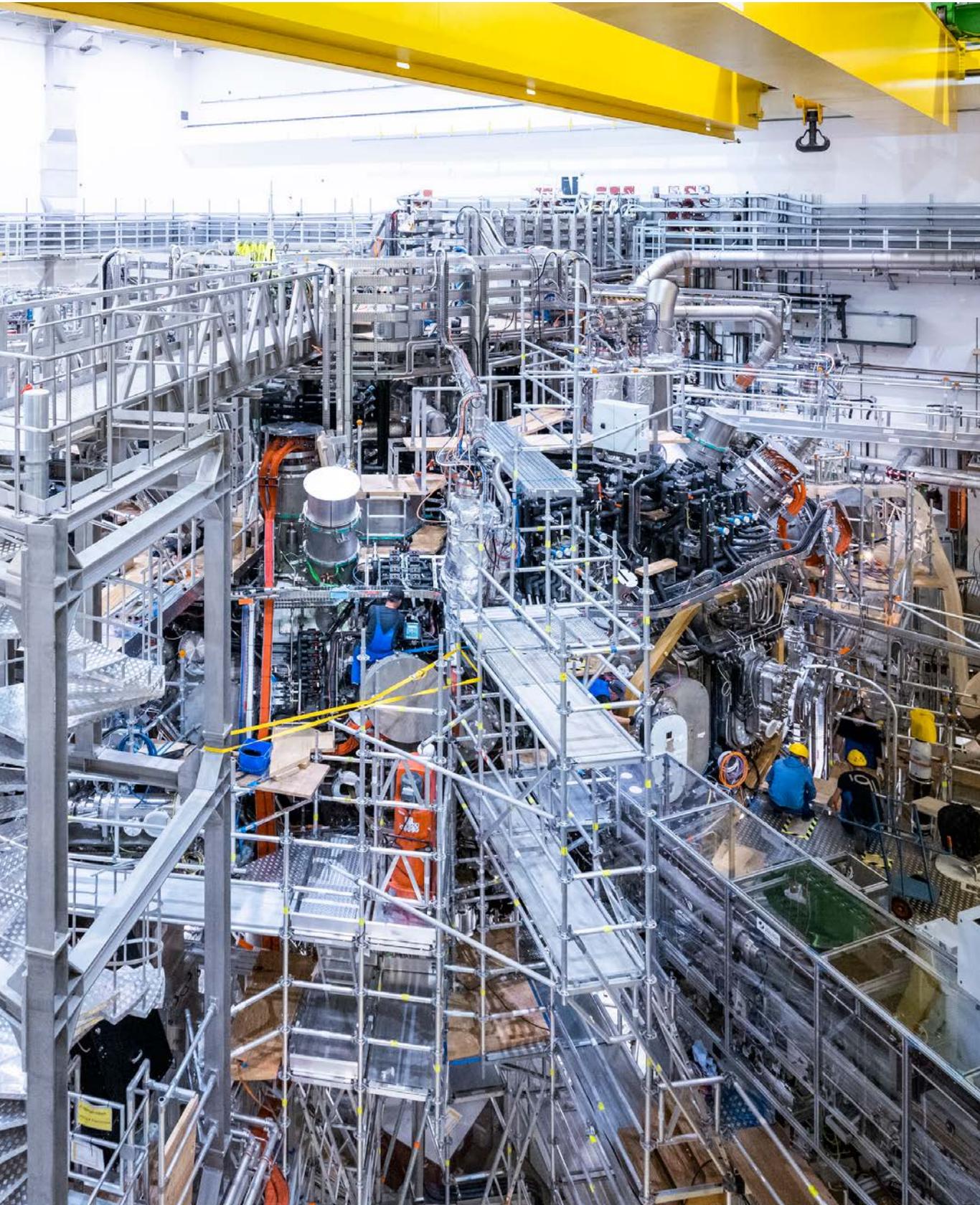
1. Forschungs- und Entwicklungsphase (heute bis erste Hälfte der 2030er-Jahre).

Eine große Rolle wird zunächst die **Weiterentwicklung der Technologiereifegrade** (TRLs – „technology readiness level“) spielen, welche sich aktuell von 1 bis ca. 4 erstrecken. Teiltechnologien der Magnetfusion sind dabei jedoch weiter fortgeschritten als

die der Laserfusion. ITER beispielsweise würde ein TRL von 5 bis 6 erschließen. In dieser Phase liegt der Schwerpunkt noch auf der Erforschung von Grundprinzipien, Zusammenhängen und Materialien, aber auch auf der Entwicklung von Komponenten und Systemen. Hier findet die Errichtung der notwendigen Strukturen in Form von Hubs statt. Dies erfordert einerseits eine starke Einbindung von Forschungseinrichtungen und Hochschulen, andererseits aber auch eine möglichst frühe Mitwirkung der Industrie. Designs und Strategien müssen in diesem Stadium mittels umfassender Studien eruiert, Erfolgsaussichten und Risiken einzelner Technologien geprüft und Pfade, die weiterverfolgt werden sollen, ausgewählt werden.



Teil des Plasmagefäßes von Wendelstein 7-X während der Fertigung



Blick in die Experimentierhalle auf die Fusionsanlage Wendelstein 7-X

Die **Unterstützung von Unternehmen**, insbesondere von KMUs und Start-ups, ist dabei grundlegend. Um die notwendigen FuE-Aktivitäten zu finanzieren und die Kommerzialisierung von Fusions-technologien zu beschleunigen und nachhaltig zu stärken, sollten Finanzierungshilfen aus Mitteln staatlicher Fördermittelgeber sowie privater Risikokapitalgeber (sog. Venture Capital) bereitstehen. Gleichzeitig müssen Unternehmen regelten Zugang zu Forschungsinfrastrukturen erhalten, um Systeme zu testen und zu verfeinern. Kooperationen zwischen Forschungseinrichtungen, Hochschulen und Unternehmen müssen in dieser Phase gestärkt werden. Eine effiziente Unterstützung der FuE-Phase soll Gegenstand eines Förderprogramms des BMBF sein (s. Kapitel 5).

2. Transferphase (erste Hälfte der 2030er-Jahre bis Anfang der 2040er-Jahre)

In der Transferphase übernimmt die Industrie zunehmend die Federführung für die weitere Entwicklung. Private Unternehmen setzen die in der FuE-Phase gewonnenen Erkenntnisse unter Beteiligung der Forschung in erste Produkte um. Finales Ziel ist die **Errichtung eines Kraftwerksprototypen**, was einer Steigerung auf TRL 7 bis 8 entspricht.

In dieser Phase soll ein **ressortübergreifendes Regierungsprogramm** unter Federführung des BMBF erstellt werden, für das auch weitere Möglichkeiten für Public-Private-Partnerships eruiert werden müssen, um die Industrie in dieser Phase stärker zu unterstützen.

3. Betriebsphase (ab den 2040er-Jahren)

Um den Strommix mit Fusionsenergie ergänzen zu können, müssen zuletzt die **Errichtung und der Betrieb** einer großen Zahl an Fusionskraftwerken durch die Industrie sichergestellt werden. Hierfür müssten in dieser Phase weiterhin Mittel für Forschung und Entwicklung zur Verbesserung der Technologien und zur Weiterentwicklung der Kraftwerke bereitgestellt werden.



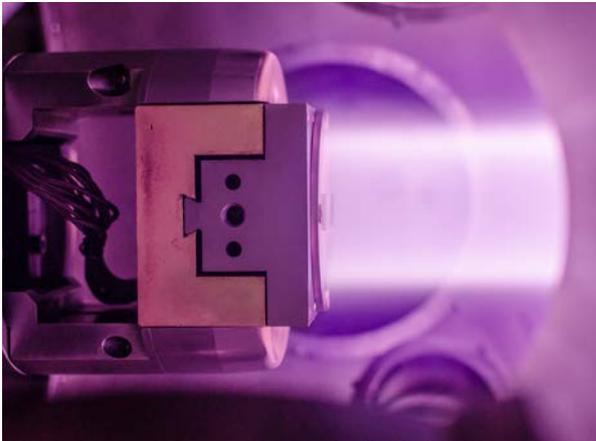
4. Handlungsfelder

Chancen nutzen und Stärken ausbauen

4.1 Magnetfusion

Die Anlage **Wendelstein 7-X** ist der weltweit fortschrittlichste **Stellarator**. Mit dem **ASDEX Upgrade (Tokamak)** verfügt Deutschland über eine zweite wichtige Testanlage. Diese Stärke gilt es in den kommenden Jahren zu erhalten, auszubauen und in Richtung einer Anwendungsorientierung weiterzuentwickeln. Dabei sollte auch zunehmend die Vernetzung mit der privaten Wirtschaft gefördert werden. Hierdurch wird im Sinne der in Kapitel 3 beschriebenen Phasen

der Übergang von der Grundlagenforschung in die industrielle Anwendung unterstützt, sodass zusätzliches privates Kapital für die Fusionsforschung aktiviert werden kann. Einige Teiltechnologien sind zudem nicht auf die Magnetfusion beschränkt, sondern können deutschen Unternehmen auf dem Weg interessante Zweit- und Drittverwertungen bieten. Das stärkt den Industriestandort Deutschland und verringert das finanzielle Risiko für Steuerzahler und Unternehmen.



Belastungstest einer Materialprobe in der Plasmaquelle PSI-2

Beispiele hierfür sind:

- Medizintechnik (z. B. durch neuartige Hochfeldmagneten, Supraleiter)
- Materialien für extreme Einsatzbedingungen (z. B. Spezialmaschinenbau, Luftfahrt, Weltraum)
- Beschleunigertechnologien (supraleitende Hochfeldmagnete)
- Telekommunikation (Gyrotrons)
- Robotik
- Hochgenaue Messtechnik (z. B. für Magnetfelder)

Mögliche Schwerpunkte und Forschungsthemen in der Magnetfusion sind:

- Forschung am Wendelstein 7-X als Modellanlage für die Plasmaphysik und Betriebsrahmenbedingungen eines Fusionskraftwerks vom Typ Stellarator
- Forschung an ASDEX Upgrade als Modellanlage für den Typ Tokamak; hier vor allem auch Klärung von Fragen der Plasmaphysik für den Bau des ITER
- Hochfeldmagnetspulen, ggf. unter Einsatz von Hochtemperatur-Supraleitern
- Plasma-Wand-Wechselwirkung und Materialforschung für die erste Wand

- Widerstandsfähige und niedrig aktivierbare Divertor-Werkstoffe
- Tritium-Kreislauf inklusive Konzepten für Tritium-Brut-Blankets
- Schnelle und hochpräzise Diagnostiksysteme für den Betrieb von Magnetfusionsanlagen. Dazu gehören die magnetische Diagnostik, bolometrische Systeme zur Plasmamessung, Mikrowellendiagnostik, Interferometrie und Spektroskopie-Instrumente für die Charakterisierung von Plasmakern- und -randbereichen sowie bildgebende Infrarotsysteme
- Besseres Verständnis fundamentaler Plasmaphysik, auch durch verbesserte Simulationstools, perspektivisch ggf. Quantencomputer, neue Simulationscodes
- Entwicklung von Remote-Handling-Systemen für kritische Teile eines Kraftwerks, auch für die komplexe Geometrie von Stellaratoren

4.2 Trägheitsfusion

Anders als in der Magnetfusion gibt es in der Trägheits- und insbesondere in der **Laserfusion** derzeit in Deutschland keine vergleichbare Forschungslandschaft. Dennoch verfügt Deutschland mit Forschungszentren, die im Bereich der Grundlagenforschung mit Hochenergielasern aktiv sind, über **exzellente Ausgangsbedingungen**. Mit Blick auf die Industrielandschaft gehört Deutschland in relevanten Technologiezweigen und benötigten Systemkomponenten (Lasertechnik, optische Komponenten, spezialisierte Sensorik) zu den führenden Nationen. Daraus ergeben sich **Chancen** für die Laserfusion in Deutschland. Durch ein neues Förderprogramm sollen die vorhandenen Standortvorteile erhalten und ausgebaut werden (**Stärken stärken**).

Mögliche Schwerpunkte und Forschungsthemen in der Laserfusion sind:

- Hochenergielaser (Konzepte und Materialien: Kühlung, Auskopplung, Effizienz, diodengepumpte Festkörperquellen, hohe Bandbreite für „direct drive“-Untersuchungen)



Die NIF-Brennstoffkapseln sind ca. 2 mm große polierte Hohlkugeln aus Kunststoff, Diamant oder Beryllium, die mit gefrorenem Wasserstoff gefüllt werden

- Targetkonzepte (Fertigung, Handhabung, Kryotechnik, Codes für Targetphysik)
- Optische Komponenten (große Aperturen, Verstärkermaterialien, Gläser, Beschichtungen, elektrooptische Materialien)
- UV- und strahlungsresistente Komponenten
- Diagnostik, die an die Bedarfe der IFE angepasst ist, inklusive strahlungsresistenter Systeme sowie verfeinerte Diagnostiken zur Validierung von Codes und Modellen (z. B. Targetkompression)
- Materialien für erste Wand und Blanket, inklusive Reinigungskonzepten, Materialcharakterisierung und Materialdaten
- Analyse der Vor- und Nachteile von direct und indirect drive
- Gesamt-Reaktorkonzepte („System Codes“, im engen Austausch mit internationalen Partnern bei gleichzeitiger Entwicklung gemeinsamer Standards)

Die Entwicklung bestimmter Komponenten steht oft in gegenseitiger Abhängigkeit. Dies ist z. B. bei der Entwicklung von Targetkonzepten und Reaktordesigns der Fall. Hier bedarf es zum einen ausreichender infrastruktureller Kapazitäten, sodass Konzepte umfassend und möglichst ganzheitlich untersucht

werden können. So sind Einrichtungen heutzutage z. B. auf eine einzige Target-Technologie spezialisiert. Dies führt dazu, dass die Untersuchungen von Varianten mit großem Aufwand verbunden sind und sogar oftmals gar nicht stattfinden können. Flexible Testbeds im Zusammenspiel mit den Hubs könnten hier deutliche Fortschritte bringen.

Zum anderen braucht es systematische Studien, um die wechselseitigen Abhängigkeiten untersuchen und einen Korridor erarbeiten zu können, entlang dessen sich ein zielführendes Gesamtkonzept entwickeln lässt, um die begrenzten Ressourcen möglichst zielgerichtet einzusetzen.

Hieraus lassen sich auch Schnittstellen für Kooperationen mit anderen Ländern und Partnern (wie z. B. ELI) identifizieren.

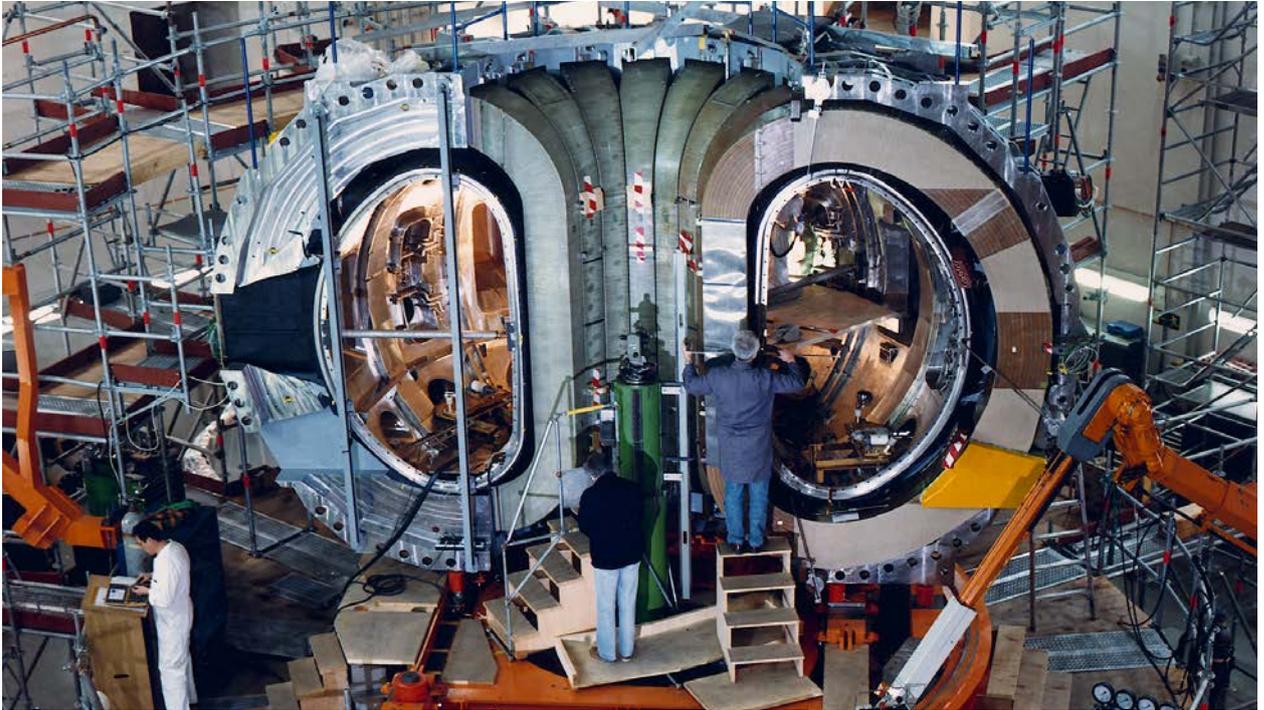
4.3 Querschnittsthemen

Für beide Ansätze (Magnet- und Laserfusion) ergeben sich eine Reihe von Querschnitts- und übergeordneten Themen, die als Nächstes angegangen werden müssen.

Ein zentrales und zeitlich wie inhaltlich prioritäres Thema ist die Durchführung von **Designstudien** für mögliche Fusionsreaktorkonzepte. Diese sind Voraussetzung für die Priorisierung geeigneter Teiltechnologien und der dafür erforderlichen FuE-Arbeiten. Zudem kann nur auf Grundlage eines vollständigen Fusionskraftwerksdesigns zu gegebener Zeit über die Realisierung von Demonstrationskraftwerken entschieden werden.

Im Bereich der **Technologieentwicklung** ist die Wahl des **Materials für die innerste Reaktorwand** mit Blick auf die intensive Neutronenbestrahlung bei der Nutzung von Deuterium und Tritium als Brennstoff von hoher Bedeutung. Für die Erforschung der Materialien sind (neuartige) Neutronenquellen wie IFMIF-DONES, an der Deutschland eine Beteiligung anstrebt, erforderlich.

Für beide Ansätze werden zudem die Erzeugung und das Handling von Tritium wichtig sein. Zudem gibt es Überschneidungen bei den **Simulationscodes** und der **Modellierung** der Prozesse. Hierzu wird Zugriff



Die Fusionsanlage ASDEX Upgrade während der Montage

auf „High Performance Computing (HPC)“-Zentren benötigt.

Grundlegendes Ziel ist es, Synergien zwischen den verschiedenen Technologieansätzen bei den Querschnittsthemen optimal zu nutzen.

Ein übergeordnetes Handlungsfeld ist, wie oben schon angekungen, die frühzeitige **Aus- und Weiterbildung von Fachkräften**. Vertiefende Studienmodule, Praktika wie auch spezielle Studiengänge sind Möglichkeiten, Nachwuchs zu gewinnen und zu hoch qualifizierten Fachkräften auszubilden. Durch die neue Dynamik in der Fusion müssen Kapazitäten in Forschung und Lehre aufgebaut und damit zusätzliches Personal angeworben und ausgebildet werden. Das betrifft vor allem die Hochenergielaser- und -plasmaphysik, die Materialforschung, aber auch spezialisiertes Personal der Informatik, des Ingenieurwesens und der Technik.

Für eine Fokussierung der Forschung in Richtung Anwendung bzw. eines Kraftwerks kommt der **Vernetzung** der exzellenten Forschungslandschaft **mit der Industrie** eine besondere Bedeutung zu. Durch direkte (auch internationale) Forschungsk Kooperationen, aber auch durch den Transfer von Fachkräften und

geistigem Eigentum (IP) kann die Fusionsindustrie mobilisiert und gestärkt werden. Davon können auch weitere periphere Industriezweige profitieren (Lasertechnik, Messtechnik, Medizintechnik etc.).

Da es in Deutschland derzeit keine einschlägigen und passfähigen **Regularien** für den Bau, den Betrieb und den Rückbau von Fusionskraftwerken (einschließlich Demonstrationsanlagen) gibt, müssen frühzeitig adäquate Regularien außerhalb des Atomrechts geschaffen bzw. bestehende Regelwerke angepasst werden. Grenzwerte, Klassifizierungen usw. müssen verbindlich festgelegt werden. Dies schafft Planungssicherheit für Unternehmen.

Von zentraler Bedeutung ist eine enge und fortlaufende **Einbindung der Öffentlichkeit** in die weitere Erforschung der Fusion, um eine umfassende Aufklärung über Chancen und Risiken dieser Technologie zu gewährleisten. Dies ist erforderlich, damit die Standortsuche und die Inbetriebnahme der ersten Anlagen in einem breiten gesellschaftlichen Konsens gelingen können und die Technologie als wichtiger Beitrag zur Energiewende erkannt und verstanden wird.



5. Ausblick und Maßnahmen des BMBF

Mit Blick auf das ambitionierte Ziel einer schnellen Realisierung von Fusionskraftwerken soll die Forschungsförderung des BMBF ausgeweitet, noch stärker programmatisch ausgerichtet und auf strategische (Teil-)Ziele fokussiert werden. Das umfasst sowohl die institutionelle Förderung (Programm „Fusion“ der HGF) als auch die neu einzurichtende Projektförderung und deren wechselseitige Vernetzung.

Eine wesentliche Säule der künftigen Förderung der Fusionsforschung bildet ein neues Förderprogramm des BMBF, welches noch im Verlauf des Jahres 2023 veröffentlicht werden soll. Neben der konkreten Projektförderung beziehen sich weitere Maßnahmen auf die Strukturierung des Forschungsumfeldes in

Deutschland und auf die Etablierung eines Fusions-ökosystems unter Einbeziehung der Öffentlichkeit. Parallel wird die Errichtung eines adäquaten Rechtsrahmens vorangetrieben.

Das Förderprogramm

Nach der Veröffentlichung dieses Positionspapiers soll die deutsche Fusions-Community (Wissenschaft und Industrie) im Rahmen eines Konsultationsprozesses die Gelegenheit erhalten, Stellungnahmen abzugeben. Das BMBF wird zur Klärung spezifischer Fragestellungen bei Bedarf zu weiteren Fachgesprächen einladen. Auf dieser Grundlage soll bis Ende 2023 ein BMBF-Förderprogramm zur Fusionsforschung entstehen, welches die bestehende institutionelle Förderung der Technologie durch eine Projektförderung ergänzt, den Rahmen für die in Kapitel 3 skizzierte erste Phase „Forschung und Entwicklung“ bildet und dafür entsprechende Prioritäten formulieren soll.

Das BMBF-Programm zur Fusionsforschung soll als lernendes Programm konzipiert werden. Obwohl bereits seit über 50 Jahren an der Fusion geforscht wird, führen die technologischen Entwicklungen der letzten Jahre und das weltweit rasant gestiegene (finanzielle) Engagement dazu, dass mit wissenschaftlichen Erkenntnissen und Durchbrüchen gerechnet werden muss, welche die Auswahl geeigneter Technologiepfade und die anvisierten Zeitskalen hin zu einem Fusionskraftwerk stark beeinflussen können. Die jüngsten Entwicklungen lassen erwarten, dass die Realisierung eines Fusionskraftwerks im besten Falle deutlich beschleunigt werden und die Errichtung eines Demonstrator-Kraftwerks mit Einspeisung in das Stromnetz entgegen früheren Prognosen noch vor dem Jahre 2045 erreicht werden könnte.

Ein Schwerpunkt des Programms soll die anwendungsorientierte Verbundforschung als eine Form einer **Public-Private-Partnership** (PPP) bilden. Diese stellt den logischen nächsten Schritt dar, um das Know-how aus der Grundlagenforschung konsequent zu nutzen. Hier sollen Projekte zu konkreten Teiltechnologien in kooperativen Projekten zwischen Forschungseinrichtungen, Hochschulen und der Industrie durchgeführt werden. Diese Art der Forschungsförderung hat sich bereits in anderen Technologiefeldern bewährt. Hierdurch können neue Erkenntnisse aus der Forschung frühzeitig aufgegriffen und Know-how an die heimische Industrie zur weiteren Verwertung transferiert werden. Neben dem Vernetzungsgedanken und den finanziellen Anreizen für die Industrie bietet diese Art der Förderung auch

einen gesicherten Rechtsrahmen für die Zusammenarbeit (auch zwischen Unternehmen), was insbesondere für KMUs und Start-ups von Bedeutung ist. Für geeignete Einzelthemen sollen auch Open-Innovation-Konzepte gefördert werden. Das BMBF wird zudem die Förderung internationaler Kooperationen und Netzwerke in Abstimmung mit den Partnerländern sowie den Maßnahmen der EU-Kommission anstreben. Dazu zählt auch die Nutzung von Forschungseinrichtungen wie z. B. der Extreme Light Infrastructure (ELI).⁹

Um Teiltechnologien umfassend zu untersuchen und dabei das vorhandene Know-how in Deutschland zu bündeln, soll die Vernetzung der Wissenschaft untereinander und mit der Industrie über die Initiierung von **Hubs** gefördert werden. In diesem Rahmen können Testeinrichtungen realisiert werden, die auch für die Industrie nutzbar sind („Signature Facilities“).

Die zeitlich begrenzte Finanzierung von **Nachwuchsgruppen** an Hochschulen soll einen zusätzlichen Anreiz für den Aufbau von Forschungskapazitäten und Know-how bilden und Studierende frühzeitig für das Thema interessieren.

Erhalt und Ausbau essenzieller Infrastrukturen

Deutschland unterstützt weiterhin den Bau des **ITER** in Cadarache. Mit dem ITER werden wertvolle praktische Erkenntnisse über den Betrieb einer hochkomplexen Fusionsanlage gewonnen, die für den Bau künftiger Fusionskraftwerke in jedem Fall relevant sein werden.

Die weitere Ausgestaltung und finanzielle Ausstattung des **Programms „Fusion“ der HGF** (an welches das IPP assoziiert ist), wird Gegenstand der demnächst beginnenden Gespräche zwischen den Zuwendungsgebern (Bund und Ländern) und der HGF zu den forschungspolitischen Zielen für die fünfte Periode der programmorientierten Förderung der HGF (PoF V) sein. In diesem Kontext muss auch der Weiterbetrieb von essenziellen Infrastrukturen (z. B. Tritium-Kreislauf am KIT, HML am FZJ, HiBEF am HZDR) sichergestellt werden.

⁹ eli-laser.eu/

Neue Instrumente im Rahmen der Sprunginnovationsförderung

Im dynamischen Umfeld einer sich rasch entwickelnden Technologie sollen auch neue Möglichkeiten von Kooperationen eruiert werden. Ein erstes Beispiel ist die Bundesagentur für Sprunginnovationen (SPRIND GmbH).

Die Fusionsforschung hat auch aus Sicht der SPRIND GmbH Zukunftspotenzial. Zur Beschleunigung der Fusionsforschung beabsichtigt die SPRIND, die Tochtergesellschaft „Pulsed Light Technologies GmbH“¹⁰ zu gründen, über die die SPRIND in den kommenden fünf Jahren bis zu 90 Millionen Euro aus Mitteln des BMBF in die Fusionsforschung investieren möchte. Die Pulsed Light Technologies soll dabei in Kooperation mit der Privatwirtschaft insbesondere die Entwicklung von Infrastruktur für die lasergetriebene Fusion voranbringen.

Neue **Forschungsinfrastrukturen** zur Erforschung oder zur Demonstration von Technologien für ein Fusionskraftwerk sollen nur unter enger Einbindung der Industrie geplant und realisiert werden.

Internationale Kooperation

Die Fusionsforschung ist schon heute in hohem Maße international aufgestellt. Beispiele hierfür sind etwa EUROfusion als Zusammenschluss der europäischen Fusionsforschungseinrichtungen oder die zahlreichen internationalen Beiträge und Nutzer bei Wendelstein 7-X. Die Forschung kann so zum Nutzen aller beteiligten Partner beschleunigt werden. Das BMBF wird weiterhin Möglichkeiten für bilaterale Kooperationen (z. B. mit den USA, UK oder Frankreich) eruiieren und ggf. fördern.

Partizipation der Öffentlichkeit

Die Einbindung der Öffentlichkeit und die Sensibilisierung der Gesellschaft für das Thema Fusionsforschung stehen im Fokus des BMBF. Das Ziel ist, durch Aufklärung eine positive Grundhaltung für die Fusion als Energietechnologie zu fördern und den potenziellen Beitrag zur Energiewende herauszustellen. Eine breite Öffentlichkeit soll unter anderem auf folgenden Wegen erreicht werden:

- Informative Websites
- Outreachkonzepte
- Erklärvideos und Nutzung sozialer Medien, ggf. unter Einbezug von geeigneten Wissenschafts-Influencerinnen und -Influencern
- Veranstaltungen mit Einbindung der Öffentlichkeit
- InnoTruck¹¹: mobile Informations- und Dialoginitiative des BMBF zur Förderung des Verständnisses und des Dialogs rund um wichtige Zukunftstechnologien

Schülerinnen und Schüler sowie Studierende können direkt über Maßnahmen wie Techniktage, Akademien oder Lernmaterial für den Physikunterricht angesprochen werden. Diese sollen sich über die gesamte Dauer des Programms erstrecken.

Regulierung und Rechtsrahmen

Das Thema der rechtlichen Rahmenbedingungen (s. Kapitel 4) wird innerhalb der Fusions-Community sowie seitens verschiedener Regierungen bereits intensiv diskutiert. In der Vergangenheit haben sich Studien bereits mit dem Thema befasst. Die Schaffung eines Rechtsrahmens soll von der Bundesregierung von Beginn an aktiv verfolgt werden.

Für den Bau und Betrieb von Fusionskraftwerken muss ein klarer Rahmen geschaffen werden, der den interessierten Unternehmen Rechts- und Planungssicherheit gewährt.

¹⁰ sprind.org/de/artikel/pulsed-light-technologies/

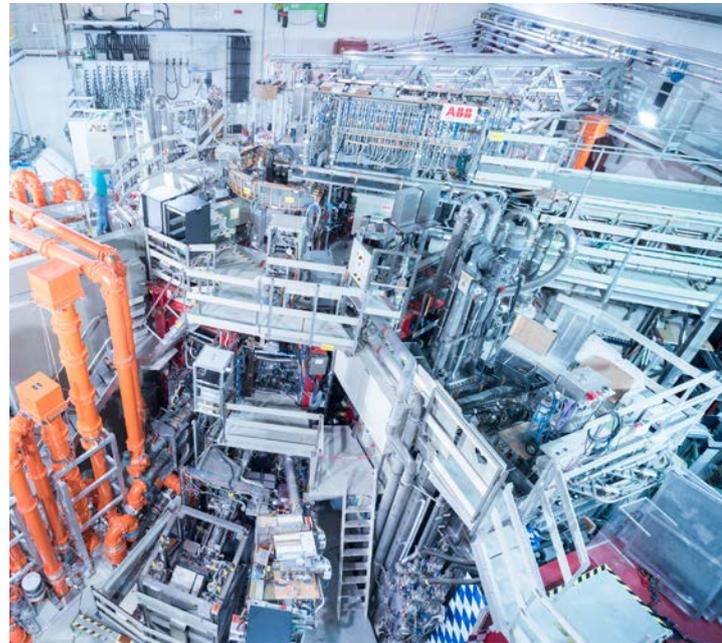
¹¹ innotruck.de

In Großbritannien ist man zu dem Schluss gekommen, dass man dort auf die bestehenden Verordnungen zum Arbeitsschutz im Umfeld ionisierender Strahlung zurückgreifen will, sodass dort aufgrund der nur geringen Strahlungsgefährdung kein Bedarf eines neuen Rechtsrahmens gesehen wird.¹² In den USA gibt es einen ähnlichen Ansatz.¹³ In Übertragung auf das deutsche Rechtssystem könnte eine Lösung in der Anpassung des Strahlenschutzgesetzes liegen. Um einen rechtssicheren Rahmen zu schaffen und insbesondere einen Widerspruch zu geltendem Recht auszuschließen, bedarf dies einer sorgfältigen Prüfung durch die Bundesregierung in Abstimmung mit der Fachszene.

Eine Erörterung der Thematik ist auch im EU-Kontext anzustreben. Ein einheitlicher Rechtsrahmen für die Fusion in den europäischen Ländern kann die Rechtssetzung in den europäischen Mitgliedsstaaten vereinfachen und beschleunigen. Hier könnte z. B. die bestehende Richtlinie zur nuklearen Sicherheit¹⁴ erweitert werden. Unter Einbeziehung technischer Sicherheitsorganisationen, wie der IAEA, könnte eine solche Richtlinie von der EU-Kommission initiiert werden.

Fazit

Dank der erheblichen Fortschritte in der Fusionsforschung in den letzten Jahren ist die Welt an einem Punkt angekommen, an dem diese Technologie nicht mehr nur ein hypothetisches Zukunftsversprechen ist, sondern konkret machbar erscheint. Daher sind strategisches Handeln und eine klare Positionierung der Bundesregierung dringend geboten, um die bestehenden Chancen entschlossen zu nutzen. Das BMBF wird mit dem geplanten Förderprogramm und weiteren Maßnahmen die oben skizzierten 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.



Die Fusionsanlage ASDEX Upgrade in Garching

12 [gov.uk/government/consultations/towards-fusion-energy-proposals-for-a-regulatory-framework](https://www.gov.uk/government/consultations/towards-fusion-energy-proposals-for-a-regulatory-framework)

13 [nrc.gov/cdn/doc-collection-news/2023/23-029.pdf](https://www.nrc.gov/cdn/doc-collection-news/2023/23-029.pdf)

14 op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/e1579af9-8d44-11ec-8c40-01aa75ed71a1/language-en

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium
für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat FZJ, HZB, HZDR, IPP; Fusion
53170 Bonn

Stand

Juni 2023

Text

BMBF

Gestaltung

neues handeln AG

Bildnachweise

Titel: MPI für Plasmaphysik/Matthias Otte/

Interpolation: MPG

S. 2, 18, 20, 27: MPI für Plasmaphysik/Jan Michael Hosan

S. 4: AdobeStock/diuno

S. 6, 13, 14, 15, 16, 22, 24: Lawrence Livermore
National Laboratory

S. 8: MPI für Plasmaphysik

S. 9 oben: FZJ/Alexander Lau

S. 9 unten: MPI für Plasmaphysik

S. 10 oben: KIT/Bernhard Ludewig

S. 10 unten: MPI für Plasmaphysik/Volker Rohde

S. 11: KIT

S. 17: MPI für Plasmaphysik/Wolfgang Filser

S. 21: FZJ/Michael Reinhart

S. 23: MPI für Plasmaphysik/S. Ert

Diese Publikation wird als Fachinformation des Bundesministeriums für Bildung und Forschung kostenlos herausgegeben. Sie ist nicht zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

