



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Förderprogramm Fusion 2040

Forschung auf dem Weg zum Fusionskraftwerk



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
1. Herausforderungen und Chancen: Ein Überblick über den Status Quo der Fusionsforschung	3
1.1 Magnetfusion	7
1.2 Trägheitsfusion	11
2. Ziele des Programms – Auf dem Weg zu einem Fusionskraftwerk	16
2.1 Strategische Bedeutung für Deutschland	16
2.2 Drei Phasen auf dem Weg zum Fusionskraftwerk	18
3. Forschungsthemen und Handlungsfelder	21
3.1 Wissenschaftlich-technische Fragestellungen	21
3.2 Das Ökosystem gestalten	26
4. Umsetzung und Maßnahmen	28
5. Rahmenbedingungen	34
5.1 Entstehung des Programms	34
5.2 Einbindung des Programms	35
5.3 Erfolgskriterien	36
5.4 Lernendes Programm und Evaluation	37

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

stellen Sie sich eine Zukunft vor, in der wir in großem Maßstab Strom produzieren können, der gleichzeitig sauber, nachhaltig und günstig ist. Eine Zukunft, in der wir als Vorreiter beim Klimaschutz agieren und in unserer Energieversorgung nicht von anderen Nationen abhängig sind. Stellen Sie sich vor, wir könnten dafür den sauberen Energieumwandlungsprozess der Sonne – die Fusion – in einem Kraftwerk nachstellen und kontrolliert in Strom umwandeln. In einem Fusionskraftwerk.

Klingt unmöglich? Bis es gemacht wird.

Mir ist bewusst: Der Weg dahin ist herausfordernd. Noch steckt die Technologie in den Kinderschuhen. Aber sie macht heute auch die ersten Schritte heraus aus den Laboren in Richtung Praxis. Es gibt verschiedene Ansätze zur Realisierung und noch ist nicht klar, welcher sich tatsächlich durchsetzen wird. Gleichzeitig sind wir im Rennen um ein wirtschaftliches Fusionskraftwerk nicht allein. Ein Blick über den Tellerrand zeigt schnell, dass die Bemühungen weltweit rasant zunehmen und auch andere Nationen relevante technologische Durchbrüche erzielen.

Jetzt gilt es, unseren Heimvorteil zu nutzen. Denn Deutschland besitzt bereits einzigartige Kompetenzen in der Erforschung der Fusion, die weltweit beachtet werden. Unsere Forschungsinstitute und unsere Zuliefererindustrie gehören beide zur internationalen Spitze. Um Deutschland im Wettlauf ganz vorne zu positionieren, müssen wir die Ergebnisse aus der heimischen Grundlagenforschung konsequent weiterentwickeln. Genau hier setzen wir mit dem vorliegenden Förderprogramm an. Mit Maßnahmen, um möglichst schnell beim großen Ziel – dem Fusionskraftwerk – anzukommen. Maßnahmen, die auch die Industrie dabei unterstützen, bereits heute einzusteigen und sich in der Fusionsforschung zu engagieren.

Besonders wichtig ist mir die Technologieoffenheit unseres Programms. Weil noch unklar ist, welche Fusionstechnologien auf dem Weg zum Kraftwerk erfolgreich sein werden, müssen wir die Chancen und Risiken einzelner Ansätze stetig evaluieren. Deshalb haben wir unser BMBF-Förderprogramm als lernenden Handlungsrahmen formuliert, mit dem wir dynamisch auf nationale wie internationale Durchbrüche reagieren und mit passenden Maßnahmen die Entwicklungen in Deutschland lenken und vorantreiben können.

Kooperation in der Forschungs- und Entwicklungslandschaft war schon immer eine deutsche Stärke. Das haben wir in vielen anderen Themenfeldern unter Beweis gestellt. Kooperation ist auch nötig, um große wissenschaftlich-technische Herausforderungen zielgerichtet und effektiv zu bewältigen und so neue Technologien in die Anwendung zu bringen. Deswegen wird das Programm den Aufbau eines Fusionsökosystems unterstützen, das die vorhandenen Stärken Deutschlands bündelt und Synergien zwischen Akteuren aus Industrie und Wissenschaft ermöglicht. Getragen wird dieses Ökosystem durch die Verbundforschung, bei der die Industrie die Richtung vorgibt, und durch attraktive Forschungsinfrastrukturen. Letztere müssen auch für die Industrie zugänglich

sein und gleichzeitig die Aus- und Weiterbildung von hochqualifiziertem Fachpersonal fördern. Außerdem sind sie Startpunkt für Kooperationen auf internationaler Ebene.

Deutschland hat heute die einmalige Chance, bei der Realisierung der Zukunftsenergie Fusion eine führende Rolle einzunehmen. Die Herausforderungen sind groß, aber die Ausgangslage ist exzellent. Ich bin mir sicher: Gemeinsam können wir es schaffen – im Schulterschluss von Politik, unserer erstklassigen Wissenschaft und unserer starken Industrie.

In diesem Sinne: Lassen Sie uns aufbrechen und gemeinsam Unmögliches möglich machen!

Bettina Stark-Watzinger
Mitglied des Deutschen Bundestages
Bundesministerin für Bildung und Forschung

1. Herausforderungen und Chancen: Ein Überblick über den Status Quo der Fusionsforschung

Eine zuverlässige Energieversorgung ist weltweit ein wesentlicher Wohlfahrtsfaktor. Die Menschheit steht jedoch vor der großen Herausforderung, den Energiebedarf künftig dauerhaft klimaneutral sicherzustellen. Die Herausforderung wird dadurch noch größer, dass – wie jüngste Studien belegen – der Bedarf an elektrischer Energie weltweit signifikant steigen wird^{1 2}. Nach Schätzungen des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) wird allein in Deutschland im Jahr 2050 etwa zwei Mal so viel Strom verbraucht wie heute^{3 4}. Diese Entwicklung ist im Wesentlichen damit zu erklären, dass energieintensive Prozesse zunehmend mit elektrischer Energie betrieben werden. Beispiele hierfür sind neben der zunehmenden Digitalisierung unserer Gesellschaft (z.B. KI-Anwendungen und Super-Computing) die wachsende Anzahl von Elektrofahrzeugen und elektrischer Heizsysteme wie zum Beispiel Wärmepumpen. Weiterer Bedarf entsteht durch die Herstellung von Grünem Wasserstoff, Ammoniak oder synthetischem Kerosin sowie durch den Ausbau der Kreislaufwirtschaft und die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre. Mit dem steigenden Bedarf an elektrischer Energie wird somit auch der Bedarf an sicheren, grundlastfähigen, bezahlbaren und CO₂-neutralen Kraftwerken entsprechend steigen.

Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, bis spätestens 2038 aus der Nutzung der Kohle und bis 2045 auch aus der Nutzung von Erdgas auszusteigen. Gleichzeitig muss jedoch der beschriebene steigende Strombedarf sichergestellt werden. Für Deutschland besteht damit das Risiko, dass die Abhängigkeit von Stromimporten weiter steigt, da der Bedarf absehbar nicht alleine aus erneuerbaren Energien sichergestellt werden kann. 2021 betrug der Anteil grüner Energien am weltweiten Strommix nicht einmal ein Drittel.⁵ Ein Grund dafür ist, dass Sonne und Wind naturbedingt nicht immer zuverlässige Energielieferanten sind. Zudem ist die Speicherung großer Mengen Energie auf wirtschaftliche Art und Weise an vielen Stellen noch Gegenstand der Forschung.

Das bedeutet: Besonders für die Industriestaaten mit ihrem hohen Stromverbrauch braucht es zukunftstaugliche Konzepte und Lösungen. Dazu gehören zum einen die kurz- und langfristige Speicherung von grünem Strom, zum Beispiel durch die Nutzung von Wasserstoff, sowie die Anpassung des Stromverbrauchs an eine flexible Stromproduktion innerhalb eines digital vernetzten Energiesystems. Darüber hinaus bedarf es zum anderen zusätzlicher Stromquellen, die grundlastfähig sind und den Strommix der Zukunft CO₂-neutral ergänzen. Die Fusion ist hier eine wichtige Option, da sie diesbezüglich ein großes Potenzial aufweist. Sie eröffnet dabei über die Sicherstellung der Energieversorgung in

¹ IEA. *Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector* (2021). In: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

² Europäische Kommission (Generaldirektion Klimapolitik, Generaldirektion Energie, Generaldirektion Mobilität und Verkehr). *Reference scenario 2020 – Energy, transport and GHG emissions – Trends to 2050* (2021). In: <https://data.europa.eu/doi/10.2833/35750>

³ Fraunhofer ISE. *Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem* (2020). In: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html>

⁴ Fraunhofer ISE. *Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Update November 2021: Klimaneutralität 2045* (2021). In: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html>

⁵ Enerdata. *Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung*. In: Globales Energie- und Klimastatistik-Jahrbuch 2022. <https://energiestatistik.enerdata.net/erneuerbare-energien/erneuerbare-anteil-in-strom-produktion.html>

Deutschland hinaus zusätzliche Chancen für die deutsche Wirtschaft und Industrie mit Blick auf den Export von Hochtechnologien in andere internationale Märkte.

Lichtblick Fusionsenergie

Fusion ist die Energiequelle der Sterne und damit die bedeutsamste Energiequelle im Universum. Gleichzeitig ist sie aber auch die einzige bislang von der Menschheit ungenutzte Primärenergiequelle. Bei extrem hohen Temperaturen von 15 Millionen Grad Celsius und einem Druck von 100 Milliarden Bar verschmelzen im Zentrum von Sternen wie unserer Sonne zwei Wasserstoffatome zu einem Heliumatom. Die durch die Bindung freigesetzte Energie ist so enorm, dass sie den Energiegewinn im Vergleich zu 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 Erzeugung elektrischer Energie in wirtschaftlicher Weise kontrolliert nachstellen, könnte auch der gesteigerte Strombedarf im Zusammenspiel mit erneuerbaren Energiequellen im gesamten Energiesystem bedeutend einfacher gedeckt werden.

Darüber hinaus bietet die Fusionsenergie perspektivisch weitere Vorteile, die sie für die Integration in das Energiesystem sehr attraktiv machen:

- Fusionsenergie ist ressourcenschonend. Potenzielle Brennstoffe sind die Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium. Einige Ansätze arbeiten mit Wasserstoff und Bor. Diese Brennstoffe sind aufgrund des Vorkommens in der Natur (Wasserstoff und Deuterium im Meerwasser, Bor in Form von Erzen, Tritium durch Erbrütung aus Lithium im Fusionsprozess selbst) in den benötigten Mengen nahezu unbegrenzt verfügbar. Nach derzeitiger Definition gehört die Fusion damit zwar formal nicht zu den „erneuerbaren“ Energiequellen, ist im Hinblick auf menschliche Zeitmaßstäbe aber unerschöpflich.
- 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, Unfall oder Anschlag würde die Reaktion unmittelbar stoppen.
- Fusionsenergie ist grundlastfähig. Anders als bei der naturbedingten Volatilität von Windkraft- oder Solaranlagen ist ein Fusionskraftwerk kontinuierlich in der Lage, das Stromnetz mit elektrischer Energie zu versorgen und könnte damit eine stabilisierende Rolle im Energiesystem übernehmen.
- Fusionsenergie ist bezahlbar. Bisherigen Abschätzungen zufolge wird Strom aus Fusion zu ähnlichen Konditionen verfügbar sein wie der aus erneuerbaren

Energiequellen.^{6 7 8} Die komplementäre Verfügbarkeit bezüglich der erneuerbaren Energien kann sich zusätzlich positiv auf den Netzstrompreis auswirken.

Um diese Vorteile nutzen zu können, ist an vielen Stellen noch intensive Forschung erforderlich. Während unstrittig ist, dass die Fusion sauber und sicher sein wird, muss zum Beispiel der Prozess zur Herstellung des Tritiums im Kraftwerk noch von Grund auf erprobt werden (siehe Kapitel 3). Lösungen für diese und viele weitere technische Herausforderungen sind dabei immer unter der Prämisse der Wirtschaftlichkeit („Bezahlbarkeit“ des Stroms) zu betrachten. Entsprechende Studien werden die Eignung für ein Fusionskraftwerk mit fortschreitendem Stand der Technik regelmäßig evaluieren müssen.

Die Forschung an den verschiedenen Teilfeldern (Kapitel 3) ermöglicht aber auch die Nutzung zahlreicher Spin-off-Effekte, die schon auf kürzeren Zeitskalen für den hiesigen Standort wirksam werden können. Diese mindern das Forschungsrisiko und sind im Rahmen des Programms ausdrücklich erwünscht. Für die Laserfusion bietet die Forschung an Hochleistungsoptiken und Laserquellen zum Beispiel Zweitverwertungsmöglichkeiten für die starke deutsche Optikindustrie für die nächste Generation von Industrie- und Forschungslasern, für Sekundärstrahlquellen und die Weiterentwicklung der EUV-Lithografie. Aus der Magnetfusion sind zum Beispiel aus der Forschung an Magnetfeldspulen und Hochtemperatursupraleitung weitere wirtschaftliche Verwendungen für die Netztechnik oder die Diagnostik in der Medizin zu erwarten.

Umgekehrt wird das Themenfeld in den nächsten Jahren auch stark von Entwicklungen in anderen Bereichen profitieren können (vgl. auch Kapitel 5). Fortschritte bei der Forschung zu künstlicher Intelligenz, zum maschinellen Lernen und zum High-Performance-Computing können für Kraftwerks- und Plasmasimulationen eingesetzt werden. Erkenntnisse aus der Materialforschung können für verschiedenste benötigte Komponenten implementiert werden. Die Forschung in den optischen Technologien ist wiederum für die Laserfusion relevant.

Fortschritte in der Fusionsforschung sind vielversprechend

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

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 ein millimetergroßes Kügelchen aus gefrorenen Wasserstoff-Isotopen, dem Target, eingestrahlt wurde (2,05 MJ). Wenngleich

⁶ Müller, I. M.: Analysis of technical and economic parameters of fusion power plants in future power systems (2019), <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.03.043>

⁷ Lindley, B.: Can fusion energy be cost-competitive and commercially viable? An analysis of magnetically confined reactors, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113511>

⁸ Schwartz, J. A.: The value of fusion energy to a decarbonized United States electric grid (2023), <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.02.006>

dies ein beachtlicher wissenschaftlicher Meilenstein in der Fusionsforschung ist, ist das Verfahren jedoch bei weitem noch nicht für eine industrielle Anwendung in Fusionskraftwerken geeignet (Kapitel 2.2).

Bei der Magnetfusion handelt es sich um den international am besten erforschten und am weitesten fortgeschrittenen Ansatz, der zurzeit die wesentliche Rolle in Forschung und investierten Unternehmen spielt (Kapitel 2.1). Mit 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.

Es ist nicht mit Sicherheit abzusehen, welcher dieser (und anderer) Ansätze 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 drei Jahren wuchsen die Gesamtinvestitionen laut der Branchenorganisation FIA („Fusion Industry Association“) um mehr als 360 % auf heute über 6,2 Milliarden US-Dollar.⁹ Selbst im letzten Jahr, das durch Inflation und allgemeine Investoren-Zurückhaltung im Tech-Sektor geprägt war, gab es noch einen Anstieg von 27 % bezogen auf 2022. Es werden nunmehr 43 Unternehmen weltweit gezählt; vier davon stammen aus Deutschland und sind dort aktiv.

Deutschland als Mitgestalter der Fusionsforschung

Um den aufgezeigten Herausforderungen der Transformation des Energiesektors zu begegnen, die Dynamik des Feldes aufzugreifen und um die Energie- sowie Technologiesouveränität Deutschlands langfristig zu sichern, fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) technologieoffen die Erforschung aller dafür geeigneten Ansätze. Neben den bereits auf dem Markt verfügbaren Technologien zur CO₂-freien Stromerzeugung, wie Windkraft, Wasserenergie, Solarenergie oder Geothermie, stellt die Fusion einen vielversprechenden Ansatz dar, den zukünftigen Strommix als CO₂-neutrale Energiequelle zu ergänzen.

Deutschland besitzt in den beiden wesentlichen Technologiezweigen bereits vielfältige und langjährige Kompetenzen (siehe unten), hat jedoch bislang den Schwerpunkt auf die Förderung der Magnetfusion gelegt. Die internationalen Fortschritte vor allem in der Laserfusion 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 Realisierungshindernisse erörtert. Zudem eruierten die Teilnehmenden, was in Forschung und Wirtschaft getan werden muss, damit Deutschland für die Zukunftstechnologie Fusion gut aufgestellt ist und optimal von ihr 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 und bewertet sowie mögliche Umsetzungskonzepte in einen Zeitplan eingeordnet hat. Die Ergebnisse der Arbeit der Expertenkommission sind in einem Memorandum mit dem Titel **„Laser Inertial Fusion**

⁹ Fusion Industry Association. In: <https://www.fusionindustryassociation.org/news/from-the-fia/>

Energy¹⁰ festgehalten. Unter Hinzunahme der bekannten Stärken und von der deutschen Magnetfusionscommunity kommunizierten Bedarfe, hat das BMBF im Juni 2023 das „Positionspapier Fusionsforschung“¹¹ veröffentlicht. Darin positioniert es sich bereits offen gegenüber weiteren strategischen Förderbemühungen im Bereich der Fusionsforschung und skizziert konkret mögliche Maßnahmen in den Bereichen Technologieförderung und Formung eines Ökosystems. Das Positionspapier bildet zusammen mit den Ergebnissen aus einem finalen Konsultationsprozess (Teilnahme von 43 Institutsgruppen und Unternehmen, siehe auch Kapitel 5) die Basis des vorliegenden Programms.

Fusion 2040 – Die Ausgangslage für Deutschland

Das Programm setzt direkt am aktuellen Stand der Technik an. Dieser wird teilweise durch Deutschland mitbestimmt, aber auch stark von verschiedenen internationalen Akteuren, öffentlich wie privat, vorangetrieben. Weltweit fokussieren sich ca. dreiviertel der Forschungsansätze auf zwei Technologieansätze: die Magnetfusion oder die Trägheitsfusion, von der die **Laserfusion** eine Variante darstellt. Hierzulande lassen sich aktuell alle Ansätze diesen beiden Grundstrategien zuordnen.

1.1 Magnetfusion

In einem Reaktor, der den Ansatz der Magnetfusion, oder Fusion mittels magnetischen Einschlusses (im englischen MFE: „Magnetic Fusion Energy“), verfolgt, kommt ein Gasmisch aus den Wasserstoffisotopen Deuterium und Tritium zum Einsatz. Dieses wird von einem Magnetfeld eingeschlossen, sodass es die Reaktorwände nicht berühren kann. Dies hat den Vorteil, dass Teilchen und Energie das Plasma nicht verlassen können. Eine sehr starke Heizung erhitzt das Plasma auf mehrere Millionen Grad Celsius, sodass ähnlich wie in der Sonne Fusionsreaktionen stattfinden können.

Der Tokamak und der Stellarator stellen die zwei gängigsten Varianten eines Magnetfusionsreaktors dar. Erste Entwicklungen des Tokamak-Grundtyps, eines torusförmigen Reaktors, wurden bereits in den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts in der Sowjetunion vorgenommen. Der Stellarator ist eine Abwandlung dieses Konzepts und stammt ebenfalls bereits aus den 1950er Jahren. Beim Stellarator ist der torusartige Grundtyp im Gegensatz zum Tokamak zusätzlich gewunden. Prinzipiell bringt diese Form entscheidende Vorteile mit sich. Zum einen hat sie einen positiven Einfluss auf den stabilen Dauerbetrieb einer solchen Anlage und zum anderen bietet sie mehr Designfreiheiten für Optimierungen. Da die Bauteile eines Stellarators aber viel komplexer und individueller als die des Tokamaks sind, ist ihre Fertigung kostspielig und der Bau sowie die Wartung des Systems komplizierter. Auch kann das Verhalten optimierter Anlagen nur durch aufwändige Simulationen vorhergesagt werden. Erste relevante Stellaratoren wurden daher erst in den 1970er Jahren realisiert. Durch den rasanten Fortschritt zum Beispiel in der Produktionstechnik oder bei den Rechenkapazitäten gilt der Stellarator jedoch mittlerweile als einer der Kandidaten für ein erstes Kraftwerk. Welches der beiden Reaktorkonzepte sich am Ende durchsetzen wird, ist aber weiter offen.

¹⁰ Memorandum Laser Inertial Fusion Energy. In: <https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230522-memorandum-laser-inertial-fusion-energy.html>

¹¹ BMBF-Positionspapier Fusionsforschung. In: https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/7/775804_Positionspapier_Fusionsforschung.html

Forschung in Deutschland, Europa und weltweit

In der Magnetfusionsforschung gehört Deutschland zu den weltweit führenden Nationen. Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) betreibt den Tokamak ASDEX Upgrade in Garching sowie den 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 Materialaktivierung und -ermüdung, der Hochfeldmagnete, des Brennstoffkreislaufs oder komplexer Reaktorkühlsysteme (für nähere Informationen zu den Forschungsinfrastrukturen zum magnetischen Einschluss siehe Infobox „Forschungsinfrastrukturen I“; für mehr Informationen zu bereits bestehenden Fusionslaboren siehe Infobox „Forschungsinfrastrukturen II“). Aufgrund des hohen Potenzials fördert das BMBF die nationalen Arbeiten an den genannten Institutionen derzeit im Rahmen der programmorientierten Förderung der HGF mit rund 150 Millionen Euro jährlich (Stand: 2023).¹²

Forschungsinfrastrukturen I: Experimente zum Magnetischen Einschluss

ASDEX Upgrade ist seit 1991 am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching bei München in Betrieb. Es ist (neben Wendelstein 7-X) die größte in Betrieb befindliche deutsche Versuchsanlage zur Entwicklung von Fusionsreaktoren und mit einem Radius von 5 Metern im internationalen Vergleich ein Tokamak von mittlerer Größe. Mit ASDEX Upgrade werden grundlegende physikalische Fragen für ITER und für das darauffolgende Demonstrationskraftwerk DEMO untersucht. So leistete er Pionierarbeit für das an ITER verwendete Divertor-Konzept, entwickelte ITER-Referenz-Szenarien und -Technologien und ist war 2007 die weltweit erste Maschine mit einer inneren Wolfram-Wand.

Das Fusionsexperiment Wendelstein 7-X am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Greifswald stellt den weltweit größten und fortschrittlichsten Stellarator dar. Das technische Kernstück des einzigartigen Magnetfeld-Designs besteht aus 50 speziell geformten, supraleitenden Magnetspulen. Die spezielle Form der Spulen geht dabei auf aufwändige Computersimulationen zurück, die erst durch Fortschritte bei Supercomputern ermöglicht wurden. Damit bietet Wendelstein 7-X eine vielversprechende Alternative zu herkömmlichen Fusionsansätzen. Anfang 2022 wurde die Endausbaustufe erreicht. Damit sind nun bei voller Heizleistung bis zu 30 Minuten lange Entladungen möglich, die den erfolgreichen Plasmaeinschluss demonstrieren und die Kraftwerkseignung des Stellarator-Konzepts nachweisen sollen.

Forschungsinfrastrukturen II: Fusionslabore

Den Schwerpunkt der Forschungsarbeiten am Forschungszentrum Jülich bilden Experimente zur Entwicklung und Charakterisierung von Werkstoffen und Komponenten für die Erste Wand und den Divertor aus Fusionsanlagen. Die lineare Plasma-Anlage PSI-2 erlaubt es, noch ungeklärte Langzeitaspekte der Plasma-Wand-Wechselwirkung zu studieren und Wandmaterialien unter dem Einfluss hoher Flüsse zu charakterisieren, wie zum Beispiel die Wasserstoffrückhaltung in Wolfram oder dessen Schädigungsgrenzen,

¹² <https://www.helmholtz.de/ueber-uns/struktur-und-governance/programmorientierte-foerderung/>

sowie der Charakterisierung von niedrig-aktivierbarem Stahl als Material für die erste Wand im Fusionsreaktor. Das Hochtemperatur-Materiallabor (HML) bietet eine Infrastruktur zur Untersuchung von schwach radioaktiven Materialien in einem Kontrollbereich und zusätzlich einen Trakt mit Heißen Zellen.

Auch im Fusionsmateriallabor des KIT sind experimentelle und analytische Arbeiten an radioaktiven und toxischen Materialien in Heißen Zellen möglich. Schwerpunkte der Arbeit zur Entwicklung neutronen-resistenter Strukturmaterialien sind die Charakterisierung von neutronenbestrahlten Materialien für zukünftige Fusionsreaktoren, Experimente zum Tritium-Aufnahme- und -Rückhalteverhalten von Materialien, toxische Materialien sowie die Entwicklung von sicheren Handhabungstechniken und von daran angepassten Untersuchungsmethoden.

Das Anfang der neunziger Jahre gegründete Tritiumlabor Karlsruhe (TLK) ist ein Halbtechnikum zur Handhabung und sicheren Einschließung des radioaktiven Wasserstoffisotops Tritium. Mit einer Umgangsgenehmigung für 40 g Tritium und einem momentanen Inventar von ca. 30 g ist das Labor weltweit einzigartig. Die Entwicklung und Erforschung eines effizienten und geschlossenen Brennstoffkreislaufs für Tritium und Deuterium, einschließlich der Gewinnung des Tritiums aus den Brutblankets und der Rückgewinnung nicht verbrauchten Tritiums, ist eine der Hauptaufgaben des TLK.

Der Helium-Kreislauf Karlsruhe (HELOKA) wird für den Test von Komponenten für Fusionsreaktoren wie Brutblanket-Modelle oder Divertor-Konzepten unter praxisrelevanten Wärmeflüssen eingesetzt. Dabei wird Helium bei hohen Drücken und hohen Temperaturen als Kühlmittel verwendet. Hier ist das KIT weltweit führend. Zur Untersuchung der periodisch wechselnden Energieeinträge im Pulsbetrieb eines Tokamaks ist die Aufrüstung um einen Energiezwischenpeicher möglich.

Auch Europa ist auf globaler Ebene ein wichtiger Akteur im Bereich der Magnetfusionsforschung. In Großbritannien steht das europäische Gemeinschaftsprojekt JET (Joint European Torus) – der bisher weltweit größte Tokamak. Er dient als Testumgebung für zahlreiche Technologien und Szenarien, die nun in der internationalen Fusionsforschungsanlage ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) Anwendung finden, die derzeit im südfranzösischen Cadarache errichtet wird. So wie JET beruht auch ITER auf dem Tokamak-Prinzip und wird auf dem Wege einer internationalen Forschungskoooperation 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 erreicht werden kann. Zudem sollen mit ITER wesentliche technologische Komponenten und Verfahren für den Betrieb eines Fusionskraftwerks entwickelt und demonstriert werden. Deutsche Unternehmen und Forschungseinrichtungen sind mit ihrer Expertise maßgeblich an der Errichtung des ITER beteiligt, unter anderem bei der Energieauskopplung (Plasma-Wand-Wechselwirkung), der Plasmaheizung (Gyrotrons, Plasmaquelle der Neutralteilchenheizung), bei Magnet- und Kryomaterialien, Brennstoffkreislauf, Brut-Blanket-Konzepten, Divertor-Technologien oder der 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 9 % der Gesamtkosten des ITER-Projekts, was etwa 20 % der europäischen Kostenbeteiligung ausmacht.

Das europäische Konsortium EUROfusion (Konsortialführer IPP) wird von der EU finanziert und setzt Forschungsaktivitäten des Forschungs- und Ausbildungsprogramms der Europäischen Atomgemeinschaft („Euratom-Programm“) um. Grundlage ist die von EUROfusion entwickelte „European Roadmap to the Realisation of Fusion Energy.“¹³ Dabei steht die Vorbereitung der ITER-Experimente sowie die Konzeption des zukünftigen Fusionsdemonstrationskraftwerks DEMO im Vordergrund.

Staatliche und private Investitionen nehmen insbesondere für die Magnetfusion 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. Genaue Zahlen zur Finanzierung sind nicht bekannt. In den USA wurde die Fusionsforschung zuletzt mit einer Summe von 763 Mio. US-Dollar im Jahr 2023 gefördert, davon gingen 31 Mio. speziell in Public-Private Partnerships und 1 Mio. in die zivile Laserfusionsforschung. Für das Jahr 2024 hat die Regierung eine Erhöhung auf rund 1 Milliarde US-Dollar beantragt. Nur 15 Mio. US-Dollar davon sind für die zivile Laserfusionsforschung vorgesehen. Mit einem umfassenden nationalen Public-Private-Partnership-Programm beabsichtigen die USA aber im Jahr 2024 unter anderem 135 Mio. US-Dollar in Projekte (MFE und Laserfusion) zu investieren, die darauf abzielen, bis Ende der 2030er Jahre erste kleine Demo-Fusionskraftwerke für zivile Zwecke zu errichten.¹⁴

Vor allem die Aktivitäten im privaten Sektor sind beachtlich. Mit großer Mehrheit wird die Erzeugung von Elektrizität als Zielmarkt gesehen.¹⁵ Insbesondere größere Unternehmen mit Investitionen von über 200 Mio. US-Dollar verfolgen den Magnetansatz. Das amerikanische Unternehmen Commonwealth Fusion Systems hat für sich genommen über zwei Milliarden Dollar für den Bau einer Testanlage vom Typ Tokamak noch in diesem Jahrzehnt eingeworben. In Deutschland sind im Jahr 2023 zwei Start-up-Unternehmen aktiv, die ein Magnetfusionskraftwerk errichten wollen.

USA

Die amerikanische Fusionsforschung ist im Programm „Fusion Energy Science“ (FES) des Energieministeriums (amtlich *United States Department of Energy, DOE*) gebündelt. Das im Text benannte Private-Partnership-Programm **Milestone Based Fusion Development Program** (Meilensteinbasiertes Fusionsentwicklungsprogramm) wurde im März 2022 vom Weißen Haus und dem Office of Fusion Energy Science im Rahmen seiner 10-Jahres-Strategie („**Bold Decadal Vision** for Commercial Fusion Energy“) verkündet. Im Zuge der Klimakonferenz 2022 definierte die Regierung die Fusion als eine von nur fünf Prioritäten zum Erreichen der Klimaziele 2050 (net zero). Im **INFUSE Programm** wird privaten Fusionsfirmen Zugang zu öffentlichen DOE-geförderten Einrichtungen und Expertise verschafft.

¹³ **European Roadmap to the Realisation of Fusion Energy.** In: <https://euro-fusion.org/eurofusion/roadmap/>

¹⁴ **Fusion Energy Sciences (FES) Budget/U.S. Department of Energy.** In: <https://science.osti.gov/fes/About/FES-Budget>

¹⁵ **Fusion Industry Association.** In: <https://www.fusionindustryassociation.org/news/from-the-fia/>

Bekannte/Bedeutende US-Anlagen:

- DIII-D (San Diego, General Atomics), Tokamak
- „National Spherical Torus Experiment - Upgrade“ (NSTX-U), Princeton Plasma Physics Laboratory, sphärischer Tokamak
- National Ignition Facility (NIF), Laserfusion, Lawrence Livermore National Laboratory
- Commonwealth Fusion Systems (CFS, Boston, MIT-Ausgründung), kompakter Hochfeld-Supraleiter-Tokamak, geplant für 2025

Start-ups:

25 **Fusions-Start-ups** in den USA; darunter die weltweit größten mit CFS (über 2 Mrd. US-Dollar), TAE (über 1 Mrd. US-Dollar), Helion Energy (577 Mio. US-Dollar) und Tokamak Energy (250 Mio. US-Dollar)

Vereinigtes Königreich

Die britische Fusionsforschung wird über die Atomenergiebehörde UKAEA koordiniert und ist geografisch um das von ihr betriebene *Culham Centre for Fusion Energy* (CCFE) bei Oxford angeordnet, auf dessen Gelände sich u. a. die Tokamaks JET, MAST Upgrade, zwei Start-ups und weitere Einrichtungen befinden. Für die Jahre 2021 bis 2025 hatte die Regierung zunächst 700 Mio. Pfund zur Verfügung gestellt sowie im Jahr 2022 zusätzlich 126 Mio. Pfund zur Kompensation der Folgen des EU-Austritts. Im September 2023 wurde das Fusion Futures Programm gestartet. Mit einem Umfang von 665 Mio. Pfund soll es bis 2027 zum Ausgleich von Nachteilen britischer Fusions-Einrichtungen durch die ausbleibende Euratom-Beteiligung beitragen. Auch UK hatte bisher überwiegend Aktivitäten in der Magnetfusion und plant nun strategische Partnerschaften in der Trägheitsfusion.

Bedeutende/bekannte Einrichtungen

- JET: größter Tokamak weltweit, Betrieb 1984-2023; bis 2021 unter EUROfusion-Koordination; 2021 Energierekord mit 59 MJ über 5 Sekunden Entladungsdauer;
- MAST Upgrade: nationales Fusionsexperiment auf Basis eines sphärischen Tokamak
- STEP: Initiative der Regierung/UKAEA für einen Kraftwerksprototyp mit Nettoenergie-Gewinn auf Basis eines sphärischen Tokamaks, Fertigstellung 2040, 220 Mio. Pfund für erste Phase 2019-2024

Start-ups

Crossfield Fusion (alternatives Konzept), First Light Fusion (Trägheitsfusion), Tokamak Energy (Magnetfusion)

1.2 Trägheitsfusion

Bei der **Trägheitsfusion** (IFE: „inertial fusion energy“) wird ein millimetergroßes Kügelchen („Target“) aus gefrorenem Brennstoff (in der Regel ein Deuterium-Tritium-Gemisch) mit hochintensiver Laserstrahlung in Bruchteilen einer Sekunde beschossen. Das Kügelchen erreicht dadurch eine Dichte, die beim Hundertfachen des ursprünglichen Wertes liegt, und

Temperaturen von bis zu 120 Millionen Grad Celsius. Durch diesen stark komprimierten Zustand können Fusionsreaktionen stattfinden, bevor das Target durch die freigesetzte Energie auseinandergetrieben wird. Das Konzept der Trägheitsfusion, speziell durch Laserbeschuss, wurde erst deutlich nach der Magnetfusion in den 1960er Jahren entwickelt. Erste Anlagen wurden in den 80er Jahren realisiert. Ursprünglich sollte das Konzept dem Ersatz von Kernwaffentests dienen. Dafür wird bis heute der sogenannte „indirect drive“ angewandt, der auch bei den Versuchen an der NIF zum Einsatz kommt (s.u.).

Innerhalb der Laserfusion unterscheidet man zwischen den Verfahren „indirect drive“, „direct drive“ und „fast ignition“, einer Variante des direct drive. Beim indirect drive gelangt die Laserstrahlung durch kleine Öffnungen in einen Hohlraum, in dessen Inneren sich das Brennstoffkügelchen (Target) befindet. Die Strahlen treffen auf die Innenwand des Hohlraums, wobei das Laserlicht in Röntgenstrahlung umgewandelt und das Target gleichmäßig bestrahlt bzw. erhitzt wird. Das von der Oberfläche des Kügelchens expandierende Plasma erzeugt einen Rückstoß, wodurch der Rest konzentrisch komprimiert wird. Im Zentrum des Targets entstehen dabei Temperaturen und Drücke, die Fusionsreaktionen möglich machen. Diese Methode ist jedoch durch die Umwandlung der Strahlung an den Hohlraumwänden mit signifikanten Verlusten verbunden und damit eigentlich ineffizient.

Beim direct drive hingegen erfolgt die Kompression direkt über die Laser-Einstrahlung. Der Hohlraum und die Umwandlung in Röntgenstrahlung wird vermieden. Diese Methode hat aufgrund der geringeren Symmetrie der eingestrahlten Leistung zwar erheblich erhöhte Anforderungen an die Laser, das Target und das Timing, ist aber energieeffizienter. Der direct drive stellte daher lange Zeit den vielversprechenderen Ansatz für zivile Anwendungen, insbesondere zur Energiegewinnung dar, wurde aber auch aufgrund der hohen Anforderungen an perfekte Symmetrie und nicht zuletzt an die Laserparameter weniger stark vorangetrieben. Ähnlich wie bei der Magnetfusion können sich die Realisierungschancen aber durch den technologischen Fortschritt der letzten Jahre, hier in der Lasertechnik und bei Computersimulationen, verbessern. In Anbetracht aller Vor- und Nachteile ist nach Expertenmeinung der Wettlauf beider Methoden – dem direct drive und dem indirect drive – weiterhin offen.

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

Der Großteil der Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Laserfusion war bislang militärisch motiviert. Weltweit führend auf dem Gebiet der Laserfusion sind die USA. Das Lawrence Livermore National Laboratory in Livermore, Kalifornien, entwickelt seit den 70er Jahren große Hochleistungslaser mit dem Ziel der Zündung eines Fusionstargets und führte auch einige Experimente zur zivilen Nutzung der Laserfusion durch. Nach einer Reihe von technologischen Durchbrüchen und Rückschlägen gelang es der Forschungseinrichtung NIFs im Dezember 2022 erstmalig, mittels 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 %.

In Europa ist insbesondere Frankreich – ebenfalls mit einem militärischen Hintergrund – in diesem Feld aktiv. Weitere Hochenergie-Laser-Einrichtungen (zivile Nutzung) stehen im Vereinigten Königreich, der Tschechischen Republik und auch in Deutschland (für einen Überblick über Einrichtungen zur Laserfusion in Deutschland siehe Infobox „Forschungsinfrastrukturen III“). Von 2008 bis 2013 arbeitete außerdem ein europäisches

Konsortium unter Mitwirkung von Deutschland an Plänen für eine europäische Laserfusions-Anlage (HIPER-Studie) und leistete damit wichtige Vorarbeiten, auf denen man aufbauen kann. Auch China, Japan und Russland treiben die Laserfusionsforschung ihrerseits voran.

Herausforderungen in der Laserfusion

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 1 %, 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 Brennstoffkügelchen ihrer Art pro Sekunde hochpräzise positioniert und gezündet werden. Die erforderliche Produktionsrate der Targets kann derzeit bei weitem noch nicht erreicht werden. Im Gegenteil: Bislang dreht es sich bei den Brennstoffkügelchen eher um Einzelstücke. Auch beschränkt sich die Anzahl der Schüsse, die mit aktuellen Lasersystemen abgegeben werden können, auf nur ein bis zwei Schüsse pro Tag, statt der etwa benötigten 1.000.000. Aufgrund dieser und anderer offenen Fragen gibt es bislang auch viel weniger konkret ausgearbeitete Kraftwerkskonzepte als bei der Magnetfusion.

Chance für die 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. So hatten die Forschungseinrichtungen der Helmholtz-Gemeinschaft, der Max-Planck-Gesellschaft und der Fraunhofer-Gesellschaft aufgrund ihrer thematischen Schwerpunkte in der Vergangenheit Berührungspunkte mit der laserbasierten Trägheitsfusion. Einige der Einrichtungen betreiben Laser von internationaler Bedeutung mit relevanten Parametern (für mehr Details zu den einzelnen Anlagen und Parametern siehe Infobox „Forschungsinfrastrukturen II“).

Forschungsinfrastrukturen III: Einrichtungen zur Laserfusion

GSI betreibt mit **PHELIX** Deutschlands energiereichste Laserexperimentieranlage mit Kurzpuls

und Nanosekunden-Pulsen bis zu 1 kJ. Zum Kurzpuls-Laserprogramm des HZDR gehört der ultraschnelle Petawatt-Laser **DRACO**, der auch für die Ausbildung von Studenten geeignet ist. **PENELOPE**, ein weiterer energiereicher diodengepumpter Petawatt-Laser (DPSSL) befindet sich im Bau und wird sich mit hochintensiver Laserphysik befassen.

Ähnlich wie PENELOPE betreibt das Helmholtz Institut Jena mit **POLARIS** ein weiteres Lasersystem von mehreren hundert Terawatt. Außerdem gibt es eine eigene Strahlführung am **XFEL** von DESY (HIBEF), die sich für grundlegende Experimente zu Stoß- und Hochenergiedichte-Plasmaphysik anbietet, wobei der ultrahelle Strahl des X-FEL als hochauflösende Plasmasonde dient. Innerhalb dieser Anlage befinden sich mehrere moderne mittlere-energetische Laser. Das *Center for Advanced Laser Applications* CALA an der TU München ist mit 2 Petawatt und 60 J die Einrichtung mit Deutschlands höchster Spitzenleistung und ist damit gut geeignet für fast ignition-Konzepte.

Zudem gibt es hierzulande bereits Unternehmen, die weltführend in der Herstellung der Targets und in der Entwicklung optischer Materialien und Komponenten, sowie der Lasersysteme sind. Viele davon sind bereits Ausrüster der führenden Forschungseinrichtungen. 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 in Deutschland zudem zwei Start-ups aktiv, die sich konkret der Realisierung eines Fusionsreaktors auf Basis der Laserfusion verschrieben haben. Daraus ergeben sich besondere Chancen und Standortvorteile für die Laserfusion in Deutschland, die durch das Förderprogramm erhalten und ausgebaut werden sollen.

Die Sicht von außen: Feststellungen der Expertinnen und Experten des Memorandums „Laser Inertial Fusion Energy“

Für einen ersten Überblick über essenzielle Handlungsbedarfe im Bereich der Trägheitsfusion werden im Folgenden die wichtigsten Aussagen des Memorandums „Laser Inertial Fusion Energy“ festgehalten. Die Ergebnisse fließen dann vor allem in die Kapitel 3 und 4 ein, um Forschungsthemen, Handlungsfelder und zu ergreifenden Maßnahmen zu umreißen.

Im Allgemeinen stellt auch das Memorandum der BMBF-Expertenkommission fest, 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 F&E-Programm daher als essenziell ein.

Darüber hinaus charakterisiert die Expertenkommission die gesellschaftlichen und technischen Herausforderungen als enorm: Das Erreichen der Klimaziele bei gleichzeitiger Ungewissheit über zielführende Konzepte erfordere große, multidisziplinäre und internationale Expertise. Es brauche ein breites IFE-Ökosystem, welches durch eine große Fachcommunity, entsprechende Infrastruktur, geregelte Handlungsrahmen und öffentliche Aufklärung kultiviert werde. Noch fehle dieses in Deutschland. Jedoch verweist die Expertenkommission auf bereits in Deutschland existierende Infrastrukturen im Bereich der Magnetfusion und auf die oben beschriebenen bestehenden Fachkompetenzen (zum Beispiel in Laser- und Target-Fertigung) im Bereich der Trägheitsfusion. Nach Meinung der Expertinnen und Experten könne Deutschland darauf aufbauen und somit Technologiehubs wie auch Exzellenzzentren errichten. Nur so ließen sich Ressourcen bündeln und aussichtsreiche Ansätze zielorientiert angehen.

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 Techniker und Technikerinnen für spätere Transfer- und Integrations-Aktivitäten.

2. Ziele des Programms – Auf dem Weg zu einem Fusionskraftwerk

Das BMBF will mit diesem Programm schnell und zielführend die grundlegenden Voraussetzungen für den Bau und Betrieb von Fusionskraftwerken schaffen. Es braucht dafür zunächst und vor allem umfangreiche Forschungsaktivitäten auf ganz unterschiedlichen Fachgebieten. Dabei werden technologieoffen sowohl die Trägheitsfusion als auch die des magnetischen Einschlusses verfolgt.

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 darum, 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, dass das BMBF auch in Zukunft technologieoffen agiert und fördert. Die verschiedenen Ansätze und ihre Erfolgsaussichten müssen daher fortlaufend und programmbegleitend neu bewertet werden. An den Einschätzungen müssen sich dann auch Forschungsentscheidungen orientieren und ggf. neu ausrichten.

2.1 Strategische Bedeutung für Deutschland

Außerhalb Deutschlands sind die USA, UK, Frankreich, Japan und China die größten Mitstreiter im Wettrennen um einen kommerziellen Fusionsreaktor. Auffällig sind die umfangreichen staatlichen Fördermaßnahmen der letzten Jahre, die ambitionierte Projekte sowohl in der Magnet- als auch in der Laserfusionsforschung unterstützen. Durch die steigenden Investitionen anderer Länder und privater Investoren eröffnen sich Chancen, wirtschaftlich arbeitende Kraftwerke schon vor der Jahrhundertmitte zu realisieren. Dies verdeutlicht den Bedarf, die nationalen Stärken effektiv zu bündeln, um im internationalen Technologiewettstreit mithalten zu können. Um einen Kompetenzverlust sowie ein Abwandern von Fachkräften zu vermeiden, müssen außerdem Forschungseinrichtungen sowie Unternehmen in der Magnet- und Laserfusion unterstützt sowie Forschungsinfrastrukturen bedarfsgerecht ausgebaut werden.

Übergeordnetes Ziel dieses Programms ist es, systematisch und schnell die grundlegenden Voraussetzungen für den Bau und Betrieb von Fusionskraftwerken zu schaffen. Hieraus lassen sich vier strategische Ziele ableiten, die mit dem Forschungsprogramm verfolgt werden:

- Beitrag zur Energiesouveränität leisten
Die Sicherstellung einer sauberen, verlässlichen und bezahlbaren Energieversorgung stellt einen wesentlichen Schlüsselfaktor für den Erhalt des Wohlstands in der Gesellschaft und des gesamten Wirtschaftsstandorts Deutschland dar. Diese Energie zukünftig klimafreundlich zu produzieren, ist eine große Herausforderung. Die Bundesregierung investiert bereits viel in die Erforschung und den Einsatz der erneuerbaren Energien, sowie deren Speicherung und Transport. Fusion ist eine der wenigen weiteren Technologien, die potenziell zu einer klimaneutralen Energieversorgung beitragen und gleichzeitig steigende Bedarfe an elektrischer Energie zur Mitte des Jahrhunderts abdecken kann. Durch ihre inhärente

Steuerbarkeit und Grundlastfähigkeit wäre sie eine ideale Ergänzung zu Solar- und Windkraft und könnte zur Flexibilisierung und Stabilisierung der Netze beitragen. Entsprechend verfolgt das BMBF mit diesem Förderprogramm das Ziel, mithilfe der Fusion die Unabhängigkeit von Importen und damit die Energiesouveränität Deutschlands und den Wohlstand der Gesellschaft auch langfristig sicherzustellen.

- Fusionstechnologie in die Anwendung bringen, Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands in den Fusionstechnologien stärken
Der Export von Hochtechnologie ist eine wesentliche Säule des deutschen Wirtschaftsmodells, ermöglicht ein hohes Maß an Wertschöpfung und trägt damit zur Sicherung des Wohlstandes bei. Bei der Fusion handelt es um eine solche komplexe Technologie. Deutschland hat hier momentan eine sehr gute internationale Ausgangslage (vgl. Kapitel 1), auf der aufgebaut werden kann. Das Programm soll dazu beitragen, das vorhandene Know-how auszubauen, neue Lösungen zu erarbeiten, und auch die Industrie deutlich stärker am Innovationsprozess zu beteiligen. Es soll ein Innovationsökosystem für die Fusion geschaffen werden, welches alle relevanten Akteure zusammenbringt, um die bereits vorhandenen Stärken bestmöglich einzusetzen. Noch gibt es keinen Markt für die Fusion, aber Deutschland hat die Chance, das Entstehen des Marktes mitzugestalten und sich zu positionieren. Auch eine Reihe anderer Technologien und Anwendungsgebiete können von Ergebnissen aus der Fusionsforschung profitieren. Es gilt folglich, Synergien zu verwandten Technologien wie zum Beispiel Laser, Materialien oder Hochleistungsrechnern zu nutzen und zu erschließen. Perspektivisch sollen Exporte gesteigert, Expertenwissen angereichert und Deutschland somit als unverzichtbarer Schlüsselakteur auf dem Markt etabliert werden.
- Technologische Souveränität in der Fusion sichern
Im Erfolgsfall kann die Fusion eine Schlüsseltechnologie auf dem Energiesektor sein. Für eine solche Technologie ist es von strategischer Relevanz, dass sie möglichst über den heimischen Markt (und zumindest innerhalb der EU) herrscht und abgebildet werden kann. Daher muss es Ziel sein, auch die Kompetenzen der zentralen Basistechnologien auf dem Weg zum Kraftwerk entlang der Wertschöpfungsketten, insbesondere auch die Fertigungskompetenzen, im Blick zu behalten und weiter auszubauen. Es braucht grundlegende Forschung auf Weltklasse-Niveau und gleichzeitig anwendungsorientierte Forschung mit Beteiligung und Federführung der Industrie. Neben entsprechenden Investitionen stehen hinter jeder Innovation vor allem Menschen: Daher soll frühzeitig auch das Thema Fachkräftenachwuchs mit maßgeschneiderten Maßnahmen adressiert werden.
- Chancen des technologischen Wandels für Wirtschaft und Gesellschaft nutzen
Erfolgreiche und wirtschaftliche Energieerzeugung durch Fusion wäre eine disruptive Technologie mit großen Chancen für eine klimaneutrale Energieproduktion – und damit von enormer wirtschaftlicher wie gesellschaftlicher Relevanz. Funktionieren kann dies aber nur bei einer entsprechenden Akzeptanz sowohl in der Industrie als auch in der Bevölkerung. Es gilt daher, begleitend zur eigentlichen Technologieentwicklung eine positive Sichtbarkeit für das Thema zu

schaffen. Hierzu dienen Maßnahmen zur Etablierung neuer Kooperationen, begleitet von einer transparenten Kommunikation und einem objektiven Erwartungsmanagement, um so einen informierten Diskurs zu ermöglichen. Da erfolgreiche Fusionsforschung zu Durchbrüchen in anderen technologischen Bereichen führen kann, ist es auch möglich, dass Deutschland dadurch weitere, hochspezialisierte Märkte erschließen und damit neue Arbeitsplätze schaffen kann. Auch dieses Ziel denkt das Förderprogramm langfristig mit. Bislang ist unser gesellschaftlicher Wohlstand außerdem nicht selten an Einbußen für die Umwelt gekoppelt. Gelingt es uns jedoch, mithilfe eines effizienten Fusionskraftwerkes saubere Energie im großen Maßstab zu gewinnen, können wir unseren Wohlstand in Bezug auf den Energieverbrauch auf verantwortungsvolle Weise aufrechterhalten. Dies hat Vorbildcharakter und kann darüber hinaus zu Kooperationen mit internationalen Wertepartnern und zur Stärkung von diplomatischen Beziehungen führen.

2.2 Drei Phasen auf dem Weg zum Fusionskraftwerk

Übergeordnetes operatives Ziel des BMBF ist die Errichtung eines (Demonstrations-) Fusionskraftwerks, mit welchem sauberer Strom erzeugt und in das Stromnetz eingespeist werden kann. 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 werden folgende drei Phasen betrachtet, die nicht scharf voneinander zu trennen sind und überlappen können:

1) Forschungs- und Entwicklungsphase (heute bis erste Hälfte der 2030er Jahre)
Auf dieser ersten Phase wird der deutliche Fokus der Maßnahmen des vorliegenden Förderprogramms liegen (vgl. Kapitel 4). Eine große Rolle wird zunächst die Weiterentwicklung der Technologiereifegrade (TRL – „Technology Readiness Level“) spielen, welche sich für die Fusionsforschung aktuell von TRL 1 bis ca. TRL 4 erstrecken. Teiltechnologien der Magnetfusion sind dabei im Schnitt weiter fortgeschritten als die der Laserfusion. Der Versuchsreaktor ITER beispielsweise soll ein TRL von 5 bis 6 erschließen, wird aber nicht vor 2035 in Betrieb gehen können. Das Programm soll dazu beitragen, diese Reifegrade für möglichst viele Komponenten und Teiltechnologien zu erreichen und damit zur Beschleunigung der Entwicklung beizutragen.

In dieser ersten Phase liegt der Schwerpunkt auf der Erforschung von Grundprinzipien, Zusammenhängen und Materialien, aber auch auf der Entwicklung von Komponenten und Systemen. Ein wesentlicher Forschungsgegenstand ist zudem die Erarbeitung von vollständigen Kraftwerksdesigns. Solche Studien liegen teilweise für die Tokamak Geometrie vor, jedoch besteht ein erheblicher Bedarf bezüglich Stellaratoren und für die Laserfusion. Für letztere existieren praktisch noch keine Konzepte. Außerdem gilt es die notwendigen regulatorischen Rahmenbedingungen zu erarbeiten und die erforderlichen Entscheidungen dafür zu treffen.

Mit der Bearbeitung dieser Fragestellungen findet ein Übergang statt von der reinen Grundlagenforschung hin zu einer anwendungs- und projektorientierten Forschung. Hierfür braucht es auch ein entsprechendes Innovationsökosystem, in dem alle relevanten Akteure effizient zusammenarbeiten können. Hierbei können auch Strukturen wie regionale oder überregionale Hubs (siehe Kapitel 4) eine wichtige Rolle spielen. Von zentraler Bedeutung

ist neben der naturgemäß starken Mitwirkung von Forschungseinrichtungen und Hochschulen eine möglichst frühe Einbindung 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. Förderentscheidungen müssen in dem Zusammenhang stetig reevaluiert und bedarfsgerecht angepasst werden.

Die Unterstützung von Unternehmen, insbesondere von KMUs und Start-ups, ist in dieser Phase grundlegend. Um die notwendigen FuE-Aktivitäten zu finanzieren und die Kommerzialisierung von Fusionstechnologien zu beschleunigen und nachhaltig zu stärken, sollten neben der institutionellen Förderung und Projektförderung auch Finanzierungshilfen aus Mitteln staatlicher Fördermittelgeber sowie privater Risikokapitalgeber (sogenanntes „Venture Capital“) bereitstehen. Aufgaben wie ein komplettes Kraftwerksdesign können nur durch, oder unter starker Mitwirkung von, Unternehmen angegangen werden. Gleichzeitig müssen Unternehmen geregelten Zugang zu Forschungsinfrastrukturen erhalten, um Systeme zu testen und zu verfeinern. Kooperationen zwischen Forschungseinrichtungen, Hochschulen und Unternehmen müssen in dieser Phase gestärkt werden.

Neben dem Know-how-Gewinn für die Fusion selbst kann die Nutzung einzelner Teiltechnologien deutschen Unternehmen auf dem Weg interessante Chancen für eine Zweit- und Drittverwertung bieten. Das stärkt den Industriestandort Deutschland und verringert das finanzielle Risiko für Steuerzahler und Unternehmen. Beispiele für solche Spin-off Effekte sind:

- Medizintechnik (zum Beispiel durch neuartige Hochfeldmagneten, Hochtemperatur - Supraleiter)
- Materialien für extreme Einsatzbedingungen (zum Beispiel Spezialmaschinenbau, Luftfahrt, Weltraum)
- Beschleunigertechnologien (supraleitende Hochfeldmagnete)
- Telekommunikation (Gyrotrons)
- Robotik
- Produktions- und Umweltmesstechnik (zum Beispiel hochgenaue Magnetfeldmessung)
- Optikindustrie (zum Beispiel Hochleistungsbeschichtungen)
- Laserindustrie (Hochleistungslaser für die Materialbearbeitung oder für Forschung)
- Hochleistungselektronik, beispielsweise Hochleistungstransformatoren, Stromnetze (Hochtemperatursupraleitung)

Insgesamt sollen durch die Maßnahmen des Förderprogramms in der ersten Phase die jeweiligen TRL der Teiltechnologien um mindestens eins bis zwei erhöht werden. Auch für das benötigte Ökosystem lassen sich entsprechende Zielgrößen definieren. So soll insbesondere die Beteiligung der Industrie gegenüber dem aktuellen Stand spürbar ausgebaut werden. Neben einer Erhöhung der Anzahl der auf dem Gebiet aktiven Start-ups soll die Förderung durch das Programm zu einer sichtbaren Beteiligung der Anwenderindustrie aus Kraftwerksbau und Netzbetreiber führen. So soll mindestens ein Drittel der geförderten Projektpartner aus der Wirtschaft kommen (KMU und Großunternehmen), mindestens 25% der Zuwendungen sollen an Unternehmen gewährt werden.

Zum optimalen Einsatz der begrenzten Ressourcen müssen im Laufe der ersten Phase strategische Prioritäten gesetzt werden, die sich an der Zielerreichung der zunächst technologieoffenen Förderung orientieren sollen. Generell gilt es, deutsche Stärken zu stärken. Um den jeweiligen Status quo zu erheben, konkrete und quantifizierbare Zielwerte für alle relevanten Subsysteme zu formulieren, erreichte Ergebnisse zu messen und Zielstellungen gegebenenfalls nach zu justieren, wird das BMBF einen kontinuierlichen Dialog mit der Fachcommunity führen. Hierzu soll auch ein paritätisch aus Wirtschaft und Wissenschaft besetzter Beirat eingerichtet werden, der die Programmumsetzung begleitet und das BMBF strategisch berät. (siehe Kapitel 5)

II) Transferphase (erste Hälfte der 2030er Jahre bis Anfang der 2040er Jahre)

In der Transferphase gewinnt die Industrie zunehmend an Bedeutung. Private Unternehmen setzen die in der FuE-Phase gewonnen Erkenntnisse unter Beteiligung der Forschung in erste Produkte um. Finales Ziel ist die Errichtung eines Kraftwerksprototypen, was einer Steigerung auf TRL 7-8 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 noch stärker zu unterstützen.

Die Regulierung der Technologie muss schon zu Beginn dieser Phase abgeschlossen sein, damit technische Betriebsfragen in die weiteren F&E Arbeiten einfließen können. Themen wie mögliche Standorte und Zwischenlagerung der (wenn auch niedrig) aktivierten Materialien müssen adressiert werden.

III) Betriebsphase (ab den 2040er Jahren)

Um den Strommix mit Fusionsenergie ergänzen zu können, muss zuletzt die Errichtung und der Betrieb einer großen Zahl an Fusionskraftwerken durch die Industrie sichergestellt werden. Das BMBF und andere Ressorts stellen in dieser Phase weiterhin Mittel für Forschung und Entwicklung für die Verbesserung der Technologien und die Weiterentwicklung der Kraftwerke bereit.

3. Forschungsthemen und Handlungsfelder

Ein Fusionskraftwerk wird unabhängig von der Technologie eine hochkomplexe Maschine sein. Viele der benötigten Technologien, Komponenten und Systeme existieren momentan nur in Form von wissenschaftlichen Experimenten oder werden in den nächsten Jahren zum ersten Mal gebaut und erprobt werden müssen. Die technologischen Reifegrade erstrecken sich etwa von TRL 1 bis 5 vom Grundlagenverständnis in der Plasmaphysik bis hin zu Produktionstechnologien für Reaktorkomponenten oder Wartungsfragen im laufenden Betrieb. Einige Entwicklungen werden sowohl für die Magnet-, als auch für die Laserfusion benötigt, sodass hier Synergien genutzt werden können. Andere sind sehr technologiespezifisch. Aus dem Stand der Technik der Magnetfusion, dem Memorandum Laserfusion und dem Konsultationsprozess zum Positionspapier Fusionsforschung ergeben sich für das Programm eine Reihe technologischer Handlungsfelder. Die jeweiligen Forschungsfragen sind nicht isoliert voneinander zu betrachten, es können aber eine Reihe von Bedarfsfeldern, bzw. Themensäulen identifiziert werden, die sich in ihrer technologischen Reife, den relevanten Communities und den notwendigen Maßnahmen unterscheiden. Die folgende Themenliste ist nicht als ausschließlich anzusehen und soll mehr einen exemplarischen Überblick über die Fragestellungen der wichtigsten in Deutschland verfolgten Technologierouten geben. Weitere Ansätze, wie die Familie der „Pinch-Effekt“ Fusion oder andere, werden hierzulande zurzeit nicht abgebildet, können aber bei der Erreichung entsprechender Meilensteine und glaubhaftem Commitment der privaten Wirtschaft im Sinne der Technologieoffenheit berücksichtigt werden.

3.1 Wissenschaftlich-technische Fragestellungen

Tritium ist für die meisten aktuellen Fusionsansätze (Laser- und Magnetfusion) essenziell, da die Mehrheit der Akteure weltweit auf die Verschmelzung von Deuterium und Tritium setzt. Ausnahmen bilden Ansätze, die einen Deuterium-Deuterium, oder einen Bor-Proton Prozess anstreben. Tritium kommt in der Natur nicht in ausreichender Verfügbarkeit vor, um den Einsatz in Fusionskraftwerken in größerem Maßstab zu ermöglichen. Tritium kann jedoch mithilfe von Neutronen aus Lithium hergestellt werden. Es gibt verschiedene Ansätze für die Tritiumherstellung im sogenannten Brut-Blanket, das direkt einen Teil der Neutronen aus der Fusionsreaktion nutzt, sodass das Kraftwerk sein eigenes Tritium herstellen könnte. Diese Ansätze sind aber zumeist experimentell nicht geprüft oder gar auf ihre Wirtschaftlichkeit untersucht. Dazu gehören Feststoffblankets aus Lithiumoxid, oder Lithiumsilikat, oder flüssige Ansätze aus einer Blei-Lithium Legierung.

Neben der rein physikalischen Testung sind Handhabung, Verarbeitung und der gesamte Tritiumkreislauf innerhalb des Kraftwerks bis zurück in die Brennkammer unverzichtbare Forschungsthemen, die mit einer breiten Palette von Herausforderungen verbunden sind. Dazu gehören je nach Ansatz zum Beispiel

- die Validierung von Modellierungsmethoden zur Brennstoffprozessierung und Brennstoffinjektion für die primäre Energiegewinnung (bei der Laserfusion für „Targets“),
- die Tritiumextraktion, zum Beispiel Tritium-Rückgewinnung in Dampfform aus dem Brutblanket-Spülgasstrom oder
- die flüssigmetallischen Funktionsmaterialien und deren Demonstration bis hin zur Reaktor-relevanten Größenskala sowie

- die Integration des äußeren Brennstoffkreislaufs in Form von Pilotanlagen und die Demonstration des Zusammenwirkens aller Systeme.

Des Weiteren wird zur in-situ Überwachung des Tritiumgehalts von Reaktorwänden und für die Diagnostik ein Konzept zum „Inline-Tritium-Monitoring“ einschließlich der Tritium-Bilanzierung benötigt. Hierfür bedarf es Innovationen in der Messtechnik. Insbesondere Laser-basierte Methoden werden zurzeit für Wasserstoff-Isotope und weitere Elemente (zum Beispiel Helium) diskutiert.

Für die weitere Handhabung des extrem flüchtigen Wasserstoffisotops werden außerdem entsprechende Pumpen benötigt. Dekontaminierungs- / Detritierungsprozesse von Komponenten müssen auf kraftwerksrelevanter Größenskala validiert werden.

Ein Forschungsthema, welches seit Jahrzehnten im Fokus der Fusionsforschung steht, ist die erste Wand („first wall“) und deren Interaktion mit dem heißen Plasma – die sogenannte Plasma-Wand-Wechselwirkung (PWW). Trotz intensiver Forschung und beachtlicher Fortschritte besteht hier weiter Handlungsbedarf, gerade auch was die konkrete Optimierung, Herstellung und Testung von niedrig aktivierbaren Materialien und Legierungen für die Reaktorwände angeht. Neuartige Komposit-Materialien oder zum Beispiel „SMART-Wolfram“ müssen neben der Grundlagenforschung auch mit Blick auf die Produzierbarkeit untersucht werden. Dazu gehören additive Fertigung, Fügetechniken und Beschichtungsverfahren mit dem Ziel der industriellen Herstellung von (individuellen) Reaktorkomponenten. Dieser Themenkomplex ist ebenfalls sowohl für die Magnetfusion als auch die meisten Ansätze der Trägheitsfusion relevant (nämlich die, die Neutronen zum Heizen erzeugen). Es gibt hier aber auch individuelle Unterschiede, wie Reaktorgeometrie oder Dauerbetrieb gegenüber Pulsbetrieb, die von Beginn an parallele Entwicklungsrouten erfordern. Hier sind die konkreten Reaktorkonzepte für die Magnetfusion momentan deutlich weiter fortgeschritten.

Die Leistungsabfuhr über das Randschichtplasma und die Wand erfordert umfängliche individuelle numerische Simulationen der Plasmarandschicht (siehe auch den Themenkomplex „Simulation“ unten). Das schließt auch den „Divertor“ mit ein, der in abseits gelegenen Bereichen der Kammer die Fusionsprodukte (wie Helium) und Verunreinigungen aus den Wandmaterialien aus der Kammer leiten soll. Auch hier gibt es zahlreiche Ansätze, um eine störungsfreie Integration in die Reaktorkammer und damit eine effiziente Leistungsabfuhr zu gewährleisten. Für eine wirtschaftliche Anwendung gilt es außerdem, die Divertorkonfiguration eines Reaktors im Hinblick auf Lebensdauer zu optimieren und ein integrales Konzept für die Diagnostik und Regelung zur Kontrolle des Betriebs bereitzustellen. Verschiedene innovative Divertor-Geometrien sind zu untersuchen.

Die Erforschung der PWW kann unter anderem beim W7-X zur Entwicklung eines Stellarator-Reaktors vorangetrieben werden. Für die Forschung ist auch die Entwicklung neuer Divertor-Manipulatoren erforderlich. Dieser erlaubt Plasmarandschichtstudien zur Optimierung des (Wolfram-)Divertors. Für den Stellarator W7-X und für zukünftige Stellarator-Reaktoren werden Technologien und Komponenten entwickelt und bereitgestellt werden müssen, die zur Beschichtung sowie in situ-Reparatur der Wände genutzt werden.

Neutronen

Tests und Qualifizierung von Materialien und Komponenten müssen unter Reaktorbedingungen erfolgen können. Das bedeutet: hohe Temperaturen, Plasmakontakt

und Teilchenbeschuss. Die deutsche Institutslandschaft bietet dafür verschiedene Einrichtungen (siehe Kapitel 1 und 4), auch wenn zusätzlicher Bedarf besteht. Ein wesentlicher (internationaler) Engpass besteht allerdings bei geeigneten Neutronenquellen. In den letzten Jahrzehnten hat die Verfügbarkeit von Neutronenquellen in Europa abgenommen. Nicht zuletzt durch die Verzögerungen bei ITER besteht hier ein Engpass für die Fusionsforschung. Für die Testung des Brut-Blankets und letztlich aller Komponenten innerhalb und außerhalb des Reaktors sind kontinuierliche experimentelle Überprüfungen erforderlich, die Neutronen im relevanten Energiespektrum und ausreichenden Flussdichten erfordern. Dazu müssen Fragen zur Handhabung von Neutronen und zu Detektoren bearbeitet werden. Dieser Themenkomplex ist daher besonders relevant für das vorliegende Programm. Neutronen als Sondenteilchen bieten aber auch vielfältige Zweitanwendungen in der (Material-)Forschung oder den tomografischen Einsatz in der Industrie.

Eine geplante Neutronenquelle für die Fusion ist IFMIF-DONES in Spanien, die Bestrahlungsmöglichkeiten zur Materialqualifizierung mit relevantem 14 MeV Neutronenspektrum zur Verfügung stellen soll. Weitere Neutronenquellen werden wahrscheinlich benötigt. Es kommen neben Beschleuniger- und Laser-getriebenen Konzepten prinzipiell auch Quellen, die auf Spaltung beruhen, infrage. Denkbar wären perspektivisch auch kleine Forschungs-Fusionsreaktoren, die vor allem für die Materialtestung errichtet werden.

Damit geht auch die Entwicklung und Normung von Werkstoffprüfmethoden an bestrahlten Proben und Kleinstproben sowie die Etablierung von skalenübergreifenden High-Throughput Methoden für die verschiedenen Strukturmaterialien unter/nach stark variablen Neutronenbelastungen einher, gilt aber auch für andere kritische Einflüsse wie mechanische und thermische Belastungen. Dafür stehen in Deutschland Labore zur Verfügung (z.B. FZJ, KIT). Ein Ausbau der Kapazitäten ist jedoch erforderlich.

Plasmaeinschluss

Für die Magnetfusion sind die namensgebenden Magnetfeldspulen der dominierende Ansatz für den Einschluss des Fusionsplasmas und weiterhin ein aktueller Forschungsgegenstand. Dabei wurden in den letzten Jahren kontinuierlich Fortschritte erzielt. Aktuell wird zunehmend der Einsatz von Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) diskutiert und vorbereitet. Die geringeren Erfordernisse bei der Kühlung gegenüber konventionellen Supraleitern erleichtern die Handhabung und verbessern die Wirtschaftlichkeit, können aber auch höhere Magnetfeldstärken erlauben und prinzipiell ein kompakteres Kraftwerksdesign mit besseren Plasmaeinschluss bieten. Erste Modellspulen mit HTS wurden vom MIT gezeigt. Die höheren Magnetfelder von bis zu 20 Tesla erfordern aber auch ein Neudesign von Kraftwerksstrukturen, um die immensen Kräfte auf die Strukturmaterialien zu bewältigen. Zudem stellt die Sprödigkeit von HTS eine Schwierigkeit in der Produktion dar. Ob sich am Ende höhere oder niedrigere Magnetfelder durchsetzen, ist noch offen.

Ein stärkerer Fokus als bislang muss auf die Praktikabilität im operativen Betrieb der Ansätze gelegt werden. Dazu gehören nicht nur die robuste Funktion im Dauerbetrieb, sondern auch die Austauschbarkeit und Wartungsmöglichkeiten von Magnetspulen (und anderen Komponenten), die in den bisherigen Forschungsanlagen nicht berücksichtigt sind, aber von Anfang mitgedacht werden müssen und ggf. ganz andere Konzepte, Materialien und ingenieurstechnische Umsetzungen von Systemen erfordern. Das betrifft insbesondere Spulendesigns für Stellaratoren, die asymmetrisch sind.

Der gesamte Themenkomplex „Hochtemperatur-Supraleitung und Hochfeldmagnete“ ist über die Fusion hinaus zudem für weitere Technologiefelder relevant. Dazu zählen die Medizintechnik, Magnetfeldsonden in der Industrie oder Stromnetze (Transformation, Transport). Es ist daher zu erwarten, dass sich hier weitere Verwertungsmöglichkeiten ergeben.

Lasersysteme

Ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt der Laserfusion sind die Lasersysteme selbst. Der aktuelle Stand der Technik reicht bei Weitem nicht aus, um die benötigten Leistungsdichten am Target zu erzeugen. Die Forschungsfragen betreffen die gesamte Wirkkette der eingesetzten Hochleistungslaser. Hauptziel ist die Entwicklung von gepulsten Lasern für verschiedene Konzepte der Laserfusion. Ein Ziel ist ein UV-Laser mit 2 bis 3 MJ Gesamtenergie, einer Repetitionsrate von 10 bis 15 Pulsen pro Sekunde und sehr geringen Pulsdauern im Bereich von wenigen Nanosekunden. Weitere Ansätze wie Fast Ignition sind ebenfalls zu verfolgen. Der Fast Ignition Ansatz erfordert mehrere Lasersysteme im Multi-100-kJ Energiebereich und Pulsdauern in der Größenordnung von Pikosekunden. Dafür müssen Laserstrahlquellen entwickelt werden, die eine mittlere Laserleistung von mindestens 30 MW bereitstellen können. Entsprechende breitbandige Vorstufenlaser sowie die Entwicklung neuer Lasermaterialien und effektive Kühlkonzepte für den laufenden Betrieb sind dabei ebenfalls zu verfolgen. Eine weitere Herausforderung besteht in den Konzepten für die Strahlengänge (Beamlines). Aktuelle Überlegungen gehen von mindestens 200 Beamlines in der Reaktorkammer aus. Hier sind durch wissenschaftliche Ansätze Wege zu finden, die Wirtschaftlichkeit und Anwendbarkeit verbessern.

Optische Systeme sind ebenfalls zu erforschen. Mit einher geht die notwendige Verbesserung von Effizienzen, Leistungen und Energielasten der Einzelkomponenten, teilweise um mehrere Größenordnungen. Neben der Erforschung von Laser- und Optikmaterialien (große Aperturen, Verstärkermaterialien, Gläser, Beschichtungen, elektro-optische Materialien, Keramik) beziehungsweise der Funktionalisierung dieser (Politur, Beschichtung) hinsichtlich der Belastbarkeit bei hohen Leistungs- und Energiedichten sind auch alternative Zugänge über Plasmaspiegel und -optiken denkbar und erzielen bereits erste vielversprechende Ergebnisse.

Eine wichtige Größe der Laserfusion ist der elektro-optische Wirkungsgrad des Systems. Für den Betrieb der Trägheitsfusion soll ein elektro-optischer Wirkungsgrad des Gesamtsystems von 10 bis 15 % erreicht werden.

Um diese Technologien in die Anwendung zu überführen, müssen sie kompakt und skalierbar sein. Ferner stehen verschiedene Ansätze durch Rohstoffverfügbarkeiten und internationalen Abhängigkeiten in Konkurrenz. Gleichzeitig ist hier der Forschungsstandort Deutschland als führender Innovationstreiber der Photonik besonders gefragt und besitzt eine sehr gute Ausgangslage. Die für die Fusion benötigten neuen Lasersysteme haben auch das Potenzial für Synergien, denn weitere Anwendungsgebiete dieser Forschungsergebnisse erstrecken sich über eine weite Palette von Märkten: Von der Medizin über die Halbleitertechnik, Produktionstechnik, Beschleunigertechnik bis hin zu anderen Aspekten der naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung.

Targets

Bei den benötigten Targets existieren im Gegensatz zu den optischen Systemen weder Märkte noch eine kohärente Innovationslandschaft. Hier bedarf es zum einen ausreichender infrastruktureller Kapazitäten, sodass Konzepte umfassend und möglichst ganzheitlich untersucht werden können. So sind Einrichtungen heutzutage zum Beispiel auf eine einzige

Target-Technologie spezialisiert und die Targets selbst sind mehr oder weniger Einzelstücke. Dies führt dazu, dass die Untersuchungen von Varianten mit großem Aufwand verbunden sind und sogar oftmals gar nicht stattfinden können. Zugleich müssen die millimetergroßen Targets hochpräzise bis in den Mikrometerbereich gefertigt werden, da aufgrund der extremen Kräfte bei der Laserkompression jede Abweichung die Zündung verhindern kann.

Die unterschiedlichen Ansätze und Zündkonzepte benötigen darüber hinaus unterschiedliche Targetkonzepte. Forschungsfragen reichen von der grundsätzlichen Hochdichteplasmaphysik und Codes für Targetphysik über die Fertigung (z.B. von Mikrostrukturschäumen), Kryotechnik, Handhabung und die Skalierung der Fertigung. Bei einer geplanten Schussrate von 10 Hz bedarf es etwa 1 Million Targets am Tag pro Kraftwerk. Testanlagen mit Lasersystemen mit Repetitionsraten von >100 Experimenten am Tag sind für die nächsten 5 bis 10 Jahre wahrscheinlich. Daher ist in der Laufzeit des Programms mindestens eine Skalierung auf diese Größenordnung anzustreben.

Daran gekoppelt ist auch die Entwicklung von passenden Injektorsystemen, ausgerichtet und konsistent mit den Prinzipien der Linienfertigung und -austauschbarkeit in einem Kraftwerk, einschließlich der Demonstration präziser Target-Positions-Erfassungssysteme für präzisen Einschuss in den Fusionsreaktor.

Simulationen

Für alle Themenfelder sind Begleit- und Vorarbeiten durch Simulationen entscheidend. Aufgrund der Komplexität und damit einhergehenden Kosten können nicht alle Optimierungszyklen real umgesetzt werden. Die Herausforderungen und Ziele sind in den verschiedenen Gebieten sehr unterschiedlich. Simulationen unterstützen die Suche nach Materialien für die erste Wand und das Reaktorgefäß oder beim Verständnis der Plasma-Wand-Wechselwirkung. Computergestützte Forschungen zeigen neue Möglichkeiten für die Optimierung von supraleitenden Spulen oder Optiken für Hochintensitätslaser auf. Der Parameterraum muss in Hinblick auf Leistung, Herstellbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Fehlertoleranzen mithilfe von computergestützten Prozessen ermittelt werden. Weiter sind noch viele Fragen der Grundlagenforschung im Bereich der Hochdichteplasmaphysik offen, die durch geschickte Implementierung physikalischer Modelle auf Hochleistungsrechnern beantwortet werden können. Die Profile von Laserpulsen, die Architektur von Strahlengängen und die Konfiguration experimenteller Parameter von Lasersystemen können mittels computergestützter und theoretischer Arbeiten vor der empirischen Umsetzung optimiert werden. Neben der Grundlagenforschung gibt es auch Bedarf an Simulationen der Anwendung. Von einzelnen First-Practice Beispielen über erste Konzepte von Kraftwerken bis hin zu Simulationen des Gesamtsystems sind noch viele Fragen offen, die im Verlauf des Innovationsprozesses Rechenkapazitäten und neue Modellbildung benötigen.

Die Schlüsseltechnologien dafür sind teilweise bereits verfügbar, teilweise werden diese durch eigene Forschungsarbeiten noch verbessert. Die Kapazitäten von Hochleistungsrechenzentren sind hierfür unerlässlich (High-Performance-Computing). Perspektivisch könnte das Quantencomputing für spezielle Probleme zur Verfügung stehen. Zu den verwendbaren Methoden zählen das maschinelle Lernen, die künstliche Intelligenz oder der digitale Zwilling.

Forschungsfelder bezüglich weiterer benötigter Kraftwerkskomponenten (IFE und/oder MFE) sind unter anderem:

- Plasmaheizung – Fertigungstechnologie für Breitband-CVD-Diamantscheiben mit großem Durchmesser für Gyrotrons und Plasmakammer; Qualifizierung der Breitbandfenstersysteme im Langpulsbetrieb mit Hochleistungsgyrotrons; Auslegungsentwicklung und -validierung von Hochleistungs-Mikrowellenantennen (mechanisch, optisch, neutronisch, zugehöriges Remote-Handling)
- Strukturmaterialien für Reaktorgefäß und periphere Strukturen - Neutronenresistenz und Niedrigaktivierbarkeit für Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Entsorgung/Recycling
- Diagnostik - Schnelle und hochpräzise Systeme für den Betrieb von Magnet- und Laserfusionsanlagen. Dazu gehören die magnetische Diagnostik, bolometrische Systeme zur Plasmamessung, Mikrowellendiagnostik, Interferometrie und Spektroskopie-Instrumente für Charakterisierung von Plasma-, Kern- und Randbereichen, Targetposition und Zündynamik, Detektion von Verunreinigungen sowie bildgebende Infrarotsysteme
- Remote-Handling-Systeme für kritische Teile eines Kraftwerks jeden Typs, aufgrund der Aktivierung von Bauteilen, der Nicht-Zugänglichkeit von Bauteilen im Betrieb, auch für die komplexe Geometrie von Stellaratoren
- Periphere Kraftwerkskomponenten – Die Temperaturen, Magnetfelder und Neutronenexposition stellen auch für die „Standard“-Komponenten eines Kraftwerks eine Herausforderung dar. Von den Kryo-Komponenten über Kabel bis hin zu Pumpen für Helium sind Weiterentwicklungen erforderlich.
- Produktionstechnik – Für neue Materialien, optimierte Geometrien und individualisierte Komponenten sind neue Fertigungstechniken, teilweise mit hohem Durchsatz, zum Beispiel bei der Spulherstellung und den Targets, erforderlich. Die Nutzung von generativen Verfahren muss untersucht werden.

Während der Bearbeitung der oben aufgeführten Themen benötigt es regelmäßig systematische (Design-)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. Im Sinne eines lernenden Programms müssen die Schwerpunkte dynamisch angepasst werden. Dazu soll auch regelmäßig ein Austausch mit den Akteuren stattfinden.

3.2 Das Ökosystem gestalten

In der ersten Phase wird die Forschung an vielen Stellen auf die Nutzung bereits bestehender Infrastrukturen bzw. deren Erweiterungen angewiesen sein.

Mit den Anlagen Wendelstein 7-X und ASDEX Upgrade verfügt Deutschland bereits über zwei wichtige Forschungsanlagen. Die Forschung am W7-X kann beispielsweise wichtige Beiträge für das Verständnis der Hochenergie-Plasmaphysik und der Betriebsrahmenbedingungen eines Fusionskraftwerks vom Typ Stellarator liefern. Für die noch sehr grundlegenden Materialfragen und den Brennstoffkreislauf sind die Labore am FZJ (HML) und KIT (TLK, HELOKA) weltweit einmalig und für die weitere Auslegung von ITER, DEMO und zunehmend auch der weiteren neuen Fusionsaktivitäten von Bedeutung (für mehr Informationen zu den einzelnen, bereits vorhandenen Laboren zu Fusionstechnologien siehe Infobox „Forschungsinfrastrukturen II“ in Kapitel 1.1). Diese Stärke gilt es in den kommenden Jahren zu erhalten, auszubauen und in Richtung einer

Anwendungsorientierung weiterzuentwickeln. Die vorhandenen Anlagen müssen fortentwickelt und an die jeweils aktuellen Forschungsfragen angepasst werden. Dabei sollte auch zunehmend die Vernetzung mit der privaten Wirtschaft gefördert werden. Hierdurch wird im Sinne der in Kapitel 2 beschriebenen Phasen der Übergang von der Grundlagenforschung in die industrielle Anwendung unterstützt, sodass zusätzliches privates Kapital für die Fusionsforschung aktiviert werden kann. Die Weiterentwicklung und Modernisierung dieser Anlagen sollen im Rahmen dieses Programms unterstützt werden.

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. Zu nennen sind hier das GSI in Darmstadt, das HZDR in Dresden sowie HIBEF am XFEL/DESY in Hamburg. Noch sind diese Anlagen nur begrenzt für Arbeiten zur Laserfusion geeignet, können aber auch bereits eine wichtige Rolle in der Ausbildung wissenschaftlichen Nachwuchses übernehmen. Die Erweiterung dieser Anlagen bezüglich der Durchführung von Experimenten für die Laserfusion sowie Kooperationen mit komplementären Einrichtungen wie der Extreme Light Infrastructure (ELI) in Tschechien ist daher anzustreben. Gleiches gilt für die Schaffung von Infrastrukturen zur Targetherstellung.

Ein übergeordnetes Handlungsfeld ist 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. Dafür müssen neue Lehrstühle geschaffen werden. Das betrifft vor allem die Hochenergielaser- und -plasmaphysik, die Materialforschung, aber auch spezialisierte Informatiker, Ingenieure und Techniker.

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 wie zum Beispiel die Laser-, Mess- oder die Medizintechnik.

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 kann und die Technologie als wichtiger Beitrag zur Energiewende erkannt und verstanden wird.

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.

4. Umsetzung und Maßnahmen

Mit Blick auf das ambitionierte Ziel einer schnellen Realisierung von Fusionskraftwerken soll die Forschungsförderung des BMBF durch das Förderprogramm ausgeweitet und auf strategischen (Teil-)Ziele fokussiert werden. Neben der konkreten Projektförderung beziehen sich weitere Maßnahmen auf die Strukturierung des Forschungsumfeldes in Deutschland sowie die Vernetzung zwischen Industrie und Wissenschaftsgemeinde als Teil eines zu etablierenden Fusionsökosystems unter Einbeziehung der Öffentlichkeit. Parallel wird die Errichtung eines adäquaten Rechtsrahmens vorangetrieben.

Fusion 2040 – Die Verbundforschung

Das BMBF-Programm zur Fusionsforschung ist als lernendes Programm konzipiert. 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 noch während der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts erreicht wird.

Um dies bestmöglich seitens des BMBF zu unterstützen, soll die anwendungsorientierte Verbundforschung als eine Form einer Public-Private-Partnership (PPP) einen Schwerpunkt des Programms bilden. Diese stellt den logischen nächsten Schritt dar, um das Know-how aus der bislang vor allem vorangetriebenen 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 und findet international viel Anerkennung. 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. Das erleichtert auch die Zusammenarbeit zwischen Unternehmen mit gegebenenfalls überlappenden Technologie-Roadmaps oder Zielmärkten, was insbesondere für KMUs und Start-ups von Bedeutung ist. Neue Innovations- und Zulieferketten können geschaffen werden.

Das BMBF wird zudem die Förderung internationaler Kooperationen und Netzwerke in Abstimmung mit den Partnerländern, wie den USA, Großbritannien, Kanada und Japan, sowie den Maßnahmen der EU-Kommission anstreben. Dazu zählt auch die Nutzung von Forschungseinrichtungen wie z.B. der Extreme Light Infrastructure (ELI)¹⁶ oder IFMIF-DONES¹⁷ (siehe unten). Projekte können zunächst bilateral zwischen Forschungsgruppen, oder für höhere Technologiereifegrade als 2+2 Formate mit Industriebeteiligung stattfinden.

¹⁶ Extreme Light Infrastructure. In: <https://eli-laser.eu/>

¹⁷ International Fusion Materials Irradiation Facility – DEMO Oriented Neutron Source. In: <https://ifmif-dones.es/>

Angepasste Förderformate – Das Ökosystem

Die kooperative Forschung trägt bereits zur Vernetzung und damit zur Entstehung eines Fusionsökosystems bei. Die unterschiedlichen Bedarfe in den Forschungszweigen zusammen mit den variierenden technologischen Reifegraden, erfordern für den Einzelfall angepasste Maßnahmen.

Zur Untersuchung spezieller Einzeltechnologien und zur Bündelung des vorhandenen Know-hows in Deutschland soll die Vernetzung der Wissenschaft untereinander sowie mit der Industrie über die Initiierung von Hubs gefördert werden, die nicht zwingend regional abgegrenzt sind. Hubs sollen zu den in Kapitel 3.1 genannten Fragestellungen eingerichtet werden. Sie bestehen jeweils aus Verbundprojekten unter Beteiligung von Industrie und Wissenschaft, die je nach Bedarf durch Testeinrichtungen ergänzt werden können, die auch für die Industrie nutzbar sind („Signature Facilities“), oder mit den Unternehmen gemeinschaftlich errichtet und betrieben werden. Im Erfolgsfall, also einer deutlichen Steigerung der technologischen Reifegrade, können die Hubs in einer späteren Phase zu Leitprojekten mit noch stärkerer Beteiligung der Industrie weiterentwickelt werden, wie es bereits erfolgreich für die Wasserstoffstrategie der Bundesregierung umgesetzt wurde.

Damit das übergeordnete Ziel des Programms – die Realisierung eines wirtschaftlich betreibbaren Fusionskraftwerks – erreicht werden kann, ist es wichtig, dass bereits in einer sehr frühen Phase Akteure aus der Industrie in Forschungs- und Entwicklungsprojekte zu dem Themenfeld einsteigen und entsprechende Investitionen tätigen. In den kommenden Jahren soll ein schlagkräftiges Innovationsökosystem für die Fusionsforschung aufgebaut und etabliert werden, in dem alle relevanten Akteure aus Wirtschaft und Wissenschaft vertreten sind. Um den Aufbau dieses Ökosystems zu beschleunigen, wird das BMBF eine **Leitstelle Fusionsforschung/Fusionsenergie** einrichten. Diese wird als erste Anlaufstelle insbesondere für interessierte Akteure aus der Wirtschaft dienen. Neben einer beratenden Tätigkeit sind verschiedenen spezifische Maßnahmen vorgesehen:

- Einrichtung einer **Fachwebseite** zum Förderprogramm als zentrale Plattform mit allen relevanten Informationen zum Themenfeld im Kontext der BMBF-Förderung (Förderbekanntmachungen, Ansprechpersonen, Projektsteckbriefe, News zu und aus den Projekten, Akteur-Atlas, themenspezifische BMBF-Publikationen usw.) einschließlich begleitendem Social-Media-Auftritt
- Informations- und Matchmakingveranstaltungen
- Unterstützung bei der Anbahnung und Begleitung internationaler Kooperationen
- Informations- und Diskussionsveranstaltungen für die breite Öffentlichkeit

Einen wichtigen Beitrag zur Vernetzung der Partner leisten Veranstaltungsformate, die zum fachlichen Austausch und zur Vernetzung innerhalb der Community und mit der Politik dienen. Sie stellen eine ideale Möglichkeit dar, Synergien und Austauschplattformen zwischen Unternehmen, Forschungsinstitutionen und der Politik zu formen. Strukturierte Austauschformate vereinfachen es zudem – ganz im Sinne eines lernenden Programms –, weitere Fördermaßnahmen am stetig wandelnden Bedarf der Fachcommunity auszurichten. Mögliche Formate und Anlässe sind zum Beispiel:

- Regelmäßiger **BMBF-Kongress Fusionsforschung** mit Expertinnen und Experten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik zum Austausch zu neuen wissenschaftlichen und technischen Entwicklungen sowie übergreifenden Querschnittsthemen

- Messeauftritte als Austauschforen und Anlaufstellen für Förderinteressierte
- Workshops zu Querschnittsthemen
- Beteiligung an wissenschaftlichen Themenwochen / Tagen der Offenen Tür
- Weitere Vernetzungsformate wie Expertengremien, Stakeholder Gespräche, Runde Tische, ...

Um mit den zuvor genannten Maßnahmen eine möglichst große Reichweite zu erzielen, sollen wo immer möglich interessierte und passende Partner wie Industrieverbände sowie bestehende Maßnahmen einbezogen werden.

Während die Anmeldung neuer Schutzrechte zumeist ein wesentliches Ziel der privatwirtschaftlichen Akteure ist, sollen für geeignete Einzelthemen auch Open-Innovation-Konzepte (Open Source, Open Hardware) gefördert werden. Das kann sich unter anderem im Themenfeld der System-Codes oder des Kraftwerkdesigns anbieten, sowie für Fragestellungen der Messtechnik. Durch Open-Innovation wird das Forschungsfeld für Akteure außerhalb der Fusion leichter zugänglich und kann die Innovationskraft für das Feld erhöhen.

In einem wissenschaftlich und technologisch komplexen Umfeld besteht ein hoher Bedarf an gut ausgebildetem Personal, sowohl in der Wissenschaft als auch in der Industrie. Nicht nur die Erforschung, sondern auch die Nutzung der neuen Technologien erfordert spezifische Kompetenzen (Hochenergie-Plasmaphysik, Materialforschung, Computational Physics, etc.). Aus diesem Grund müssen Absolvierende der relevanten Disziplinen wie Physik, Mathematik, Informatik und Ingenieurwissenschaften schon in ihren Ausbildungsgängen an das Thema herangeführt und enge Kooperationen zwischen Unternehmen und Ausbildungsstätten etabliert werden. Die zeitlich begrenzte Finanzierung von Nachwuchsgruppen an Hochschulen, insbesondere die Förderung von Doktoranden und Post-Docs, soll einen zusätzlichen Anreiz für den Aufbau von Forschungskapazitäten und Know-how bilden und Studierende frühzeitig für das Thema interessieren. Hierzu wird das BMBF auch auf die Bundesländer zugehen, um auf die Einrichtung entsprechender Lehrstühle an den Hochschulen hinzuwirken.

Dies kann begleitet werden durch Seminar- oder Akademiewochen, die Schülerinnen und Schülern sowie Studierenden aus unterschiedlichen Fachrichtungen das Themenfeld näherbringen. Auch können sie mit speziellen Praxistagen oder Vernetzungsformaten wie „Meet-the-CEO“ direkte Kontakte zu Instituten, Unternehmen und Start-ups als potenzielle Arbeitgeber bieten.

Für besondere Durchbrüche oder herausragende Studienarbeiten kann jährlich ein Innovationspreis durch das BMBF vergeben werden. Dieses Format kann in Kooperation mit der Industrie ausgestaltet werden. Erste initiale Ansätze einzelner Akteure bestehen bereits. Durch das Aufgreifen solcher Innovationspreise durch die Politik sollen junge Menschen Relevanz und Anerkennung ihrer Arbeiten erfahren, die sie dazu ermutigen, ihren Pioniergeist und ihre Leidenschaft für das Thema aufrechtzuerhalten und auszubauen.

Erhalt und Ausbau essenzieller Infrastrukturen

Deutschland unterstützt weiterhin den Bau des ITER in Cadarache. Mit ITER werden wertvolle praktische Erkenntnisse über den Betrieb einer hoch komplexen Fusionsanlage gewonnen, die für den Bau künftiger Fusionskraftwerke in jedem Fall relevant sein werden. Der ITER ist damit eine Stärke und wichtig Säule der europäischen Fusionsforschung. Das BMBF fördert in diesem Rahmen auch das deutsche „**Fusion Industrial Liaison Office**“ (FILO), dessen Aufgabe es ist, deutsche Unternehmen im Rahmen einer sich herausbildenden europäischen Fusionsindustrie zu unterstützen. Die regelmäßige Veranstaltung „Fusion Forum Deutschland“ mit inzwischen über 100 Teilnehmern dient dabei als wichtige Plattform zum gegenseitigen Austausch und der Vernetzung. Beides soll durch das Programm perpetuiert werden.

Die weitere Ausgestaltung und finanzielle Ausstattung des Programms Fusion in der HGF (an welches das IPP assoziiert ist) wird Gegenstand von Gesprächen zwischen Bund, 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 (zum Beispiel Tritiumkreislauf am KIT, HML am FZJ, HiBEF am HZDR) sichergestellt werden. Wo es bereits den Bedarf und Pläne zur Erweiterung dieser Infrastrukturen gibt (zum Beispiel HiBEF 2.0, HELOKA Upgrade Storage, Gyrotron-Teststand FULGOR), ist eine begrenzte Förderung durch das Programm zur Forcierung und Beschleunigung zu prüfen.

Neue Forschungsinfrastrukturen – etwa zur Erprobung oder zur Demonstration von Technologien oder zur Entwicklung von Materialien für ein Fusionskraftwerk – sollen bestmöglich unter Einbindung der Industrie geplant und realisiert werden. Dabei bieten sich Hubs (in Deutschland) auf solchen Feldern an, in denen Deutschland seine spezifischen Stärken ausspielen kann und eine bestehende Nachfrage adressiert. Mögliche Themen wären Materialien, Magnete, Targets, Laser oder der Tritiumkreislauf. Gerade bei der Errichtung und dem Betrieb von Forschungsinfrastrukturen ist eine internationale Abstimmung von großer Bedeutung, etwa im Rahmen gemeinsamer Roadmaps. Auch hier kann das Programm durch eine begrenzte Förderung die Prozesse anstoßen und bei der Erschließung weiterer Finanzquellen unterstützen.

Neue Instrumente

Im dynamischen Umfeld einer sich rasch entwickelnden Technologie sollen auch neue Möglichkeiten von PPPs 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 möchte die SPRIND in einem ersten Schritt die Tochtergesellschaft „Pulsed Light Technologies GmbH“ gründen, über die in den kommenden fünf Jahren bis zu 90 Mio. Euro aus Mitteln des BMBF investiert werden sollen. Die Pulsed Light Technologies soll dabei in Kooperation mit der Privatwirtschaft die Entwicklung von Infrastrukturen für die lasergetriebene Fusion voranbringen.

Europäische und internationale Kooperation

Die Fusionsforschung ist schon heute in hohem Maße international aufgestellt. Auf europäischer Ebene erfolgt die Kooperation im Rahmen von EUROfusion, einem Zusammenschluss der europäischen Fusionsforschungseinrichtungen, der die europäischen Fusionsforschungsaktivitäten bündelt und koordiniert. Die nationalen Aktivitäten sollen in strategischer Koordination mit den Aktivitäten von EUROfusion erfolgen, auch um Doppelförderung zu vermeiden. Als Schnittstelle zwischen der Kommission, dem Euratom-Programm und den Mitgliedstaaten unterhält das BMBF in der Nationalen Kontaktstelle Euratom bereits die Fachkontaktstelle Fusionsforschung.

Von besonderer Bedeutung ist eine internationale Abstimmung im Bereich der Forschungsinfrastrukturen. Ein wichtiger Leuchtturm in der internationalen Forschungs-Kooperation wird die Materialforschungsanlage IFMIF-DONES sein. Deutschland ist hier bereits im Steering Committee als Beobachter vertreten. Eine spätere Nutzung der Anlage ist über spezifische finanzielle Beiträge der Partnerländer vorgesehen. Hier strebt Deutschland eine Beteiligung an, um die Führung in der Entwicklung von Fusions-Materialien zu erhalten und auszubauen.

Das BMBF wird weiterhin Möglichkeiten für bilaterale Kooperationen, z.B. mit den USA, UK, Frankreich, Japan und Kanada prüfen und wo möglich fördern. Auf Ebene der Institute besteht bereits eine gute Vernetzung mit Partnern in diesen Ländern, auf die aufgebaut werden kann. Das legen auch die Ergebnisse aus dem Konsultationsprozess nah.

Bei globalen Herausforderungen wie etwa der zukünftigen, nachhaltigen Energieversorgung ist jede mögliche Kooperation zu prüfen. Es werden dabei vor allem Kooperationen auf Augenhöhe mit internationalen Wertepartnern und gegenseitigem Interesse angestrebt.

Partizipation der Öffentlichkeit

Die Einbindung der Öffentlichkeit und die Sensibilisierung der Gesellschaft für das Thema Fusionsforschung steht 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. Einen ersten Schritt geht das BMBF bereits mit der Kampagne Zukunftsenergien¹⁸. Eine breite Öffentlichkeit soll zukünftig unter anderem auf folgenden Wegen erreicht werden:

- Informative Websites zum aktuellen Stand der Forschung, Förderprojekten und öffentlich geförderten Maßnahmen, Studienpreise, etc.;
- Maßgeschneiderte Initiativen zur Förderung von Outreachkonzepten wie zum Beispiel Wanderausstellungen oder Gamification-Ansätze zur Wissensvermittlung;
- Erklärvideos und Nutzung sozialer Medien ggf. unter Einbezug von geeigneten Wissenschafts-Influencern, auch zu aktuellen Entwicklungen und Nachrichten in der Fusion;
- Veranstaltungen mit Einbindung der Öffentlichkeit, Industrie und Instituten;

¹⁸ **Zukunftsenergien**. *Auf dem Weg zur Energieversorgung der Zukunft – mit klimafreundlichem Wasserstoff und Fusion*. In: https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/zukunftsenergien/zukunftsenergien_node.html

- InnoTruck¹⁹: 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 Techniktage, Akademien und Lernmaterial für den Physikunterricht angesprochen werden. Diese Maßnahmen sollen sich über die gesamte Dauer des Programms erstrecken.

Regulierung und Rechtsrahmen

Dem Thema der rechtlichen Rahmenbedingungen kommt bei der Fusion eine besondere Bedeutung zu (siehe Kapitel 3) und wird innerhalb der Fusionscommunity 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. Der Betrieb eines Kraftwerks geht mit der vorübergehenden Aktivierung von Kraftwerkskomponenten einher. Durch die Abklingzeiten von wenigen Jahrzehnten ist keine Endlagerung erforderlich und der radioaktive Footprint eines Fusionskraftwerks ist daher mit einer Beschleunigeranlage oder einer Einrichtung zur Radionuklidproduktion vergleichbar. Für den Bau und Betrieb von Fusionskraftwerken muss ein klarer Rahmen geschaffen werden, der den interessierten Unternehmen Rechts- und Planungssicherheit gewährt.

In Großbritannien²⁰ 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. In den USA gibt es einen ähnlichen Ansatz²¹. 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 Mitgliedsstaaten vereinfachen und beschleunigen. Hier könnte zum Beispiel die bestehende Richtlinie zur nuklearen Sicherheit²² erweitert werden. Unter Einbeziehung technischer Sicherheitsorganisationen, wie der IAEA, könnte eine solche Richtlinie von der EU-Kommission initiiert werden.

Um hier zügig konkrete Vorschläge zu erarbeiten, soll direkt zu Beginn des Programms ein entsprechendes nationales Pilotprojekt durch das BMBF gestartet werden.

¹⁹ **BMBF-Initiative InnoTruck.** In: www.innotruck.de

²⁰ **Towards fusion energy: proposals for a regulatory framework.** In: <https://www.gov.uk/government/consultations/towards-fusion-energy-proposals-for-a-regulatory-framework>

²¹ **Nuclear Regulatory Commission. NRC to Regulate Fusion Energy Systems Based on Existing Nuclear Materials Licensing.** In: <https://www.nrc.gov/cdn/doc-collection-news/2023/23-029.pdf>

²² **Europäische Kommission. Study on the applicability of the regulatory framework for nuclear facilities to fusion facilities.** In: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/e1579af9-8d44-11ec-8c40-01aa75ed71a1/language-en>

5. Rahmenbedingungen

5.1 Entstehung des Programms

Die erreichten Meilensteine in den letzten Jahren, insbesondere in der Laserfusion an der NIF, aber auch die Fortschritte in der Magnetfusion am Wendelstein 7-X oder am JET, haben die Fusion als potenzielle CO₂-neutrale Energiequelle stark in den Fokus der öffentlichen Aufmerksamkeit gerückt. Strategisch ist die Fusion für den hiesigen Wirtschaftsstandort aufgrund des bestehenden Know-hows hoch interessant. Ein erhebliches Bundesinteresse ergibt sich neben den wirtschaftlichen Chancen vor allem aus der Frage der Energiesouveränität.

Um den konkreten Handlungsbedarf festzustellen und die Neuaufstellung der Fusionsforschung in Deutschland zu strukturieren, die sich durch die neue Dynamik des Feldes, zum Beispiel auch durch zahlreiche internationale Unternehmensgründungen ergibt, wurde durch das BMBF ein Strategieprozess gestartet:

Bereits Anfang 2022 hat das BMBF mit einem Fachgespräch zum Thema Laserfusion mit Akteuren aus Wirtschaft und Wissenschaft 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. Um dieses Feld näher zu beleuchten und insbesondere die deutschen Potenziale herauszuarbeiten, hat das BMBF Ende 2022 eine internationale Expertenkommission (USA, Japan, Großbritannien, Deutschland) mit einer Analyse und der Erstellung entsprechender Empfehlungen beauftragt. Die Ergebnisse sind in einem Memorandum mit dem Titel „Laser Inertial Fusion Energy“²³ festgehalten, welches am 22. Mai 2023 an die Bundesforschungsministerin übergeben wurde. Gleichzeitig formulierten die Akteure der bestehenden institutionellen Förderung in einem Entscheidungsfahrplan die aus ihrer Sicht notwendigen Maßnahmen auf dem Weg zu einem (deutschen Magnet-)Fusionskraftwerk.

Auf Basis der geführten Gespräche und der nun vorhandenen Strategiepapiere der Fachcommunity (von Unternehmen und Academia) hat das BMBF im Anschluss am 22. Juni 2023 sein „Positionspapier Fusionsforschung“²⁴ veröffentlicht, welches Handlungsfelder und mögliche, strategisch ausgerichtete Maßnahmen in der Magnet- und Laserfusionsforschung umreißt. Dieses bildet als Ergebnis des strategischen Auditprozesses, anstelle einer ex-ante Evaluation, die Basis für das vorliegende Förderprogramm.

In einem Online-Konsultationsprozess wurde der gesamten Fachcommunity anschließend noch einmal die Möglichkeit für Stellungnahmen und eigene Eingaben gegeben, sodass damit ein vollständiges Bild für die Bedarfe der deutschen Fusionsforschung vorlag. Mit insgesamt 43 Eingaben (von 16 Unternehmen, acht verschiedenen Instituten und fünf weiteren Akteuren wie Verbänden etc.) haben sich nahezu alle im Bereich der Fusionsforschung führenden und in Deutschland aktiven Unternehmen, Universitäten und

²³ **BMBF-Pressemitteilung**. Stark-Watzinger: *Brauchen mehr Ambition auf dem Weg zu einem Fusionskraftwerk*. In: <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/pressemitteilungen/de/2023/05/220523-MemorandumLaserfusion.html>

²⁴ **BMBF-Positionspapier Fusionsforschung**. In: https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/7/775804_Positionspapier_Fusionsforschung.html

außeruniversitären Forschungseinrichtungen an diesem Konsultationsprozess beteiligt. Alle eingegangenen Eingaben wurden durch das BMBF sorgfältig ausgewertet und geprüft. Im Ergebnis hat der Konsultationsprozess alle Aussagen des BMBF-Positionspapiers bestätigt und mit zusätzlichen Detailaspekten untermauert, die nun bei der Ausarbeitung des Förderprogramms einbezogen wurden.

5.2 Einbindung des Programms

Das neue Fachprogramm erweitert die langjährige institutionelle Förderung der Grundlagenforschung Fusion des BMBF um einen Fokus auf die Anwendungsorientierung und in letzter Konsequenz in Richtung eines Fusionskraftwerks. Dieser Ansatz bleibt mit der Grundlagenforschung thematisch eng verwoben, da weiterhin eine Reihe von grundlegenden Fragen zu klären und physikalisches Grundlagenverständnis aufzubauen ist. Die auf dem Gebiet der Fusion aktiven Institute in Deutschland sind zudem wesentliche Know-how-Träger. Besonders gilt dies für den Bereich der Magnetfusion.

Internationale Kooperation wird für die Fusionsforschung ein wesentlicher Faktor zur Beschleunigung von Technologiefortschritten sein. Die Technologie ist sehr komplex, und jeder weitere Schritt Richtung Anwendung bedarf eines immensen Einsatzes an Kapital und Personal. Kein einzelnes Unternehmen oder Land wird dies im Alleingang leisten können. Das Programm soll daher auch einen Beitrag zur internationalen Vernetzung in der Fusion leisten, indem es zum Beispiel bi- oder multilaterale Projekte zu Basistechnologien auf dem Weg zum Kraftwerk ermöglicht oder durch entsprechende Projekte auch zum Aufbau internationaler Forschungsinfrastrukturen beiträgt.

Das Förderprogramm soll national wie international die Vernetzung innerhalb der Fachcommunity befördern und diese – insbesondere mit Blick auf die Wirtschaft – erweitern. Durch die Vielzahl der benötigten Technologien, die entweder aus anderen Forschungsfeldern heraus für die Fusion nutzbar gemacht werden können, oder sich aus der Fusionsforschung stammend für Zweitverwertungen in anderen Branchen eignen, ergeben sich zudem zahlreiche Anknüpfungspunkte und Schnittmengen mit anderen Strategien und Programmen der Bundesregierung:

- Insbesondere zu nennen ist die „Zukunftsstrategie Forschung und Innovation“ der Bundesregierung²⁵, in der die Fusionsforschung in Mission 1 „Ressourceneffiziente und auf kreislauffähiges Wirtschaften ausgelegte wettbewerbsfähige Industrie und nachhaltige Mobilität ermöglichen“, dort in der Teilmission „Erneuerbare und sichere Energie erschließen“ aufgeführt ist.
- Die Fusionsforschung ist Teil des Energieforschungsprogramms der Bundesregierung.
- Die BMBF-Strategie zur Forschung für Nachhaltigkeit (FONA)²⁶ zielt mit einem breit gefächerten Ansatz auf eine nachhaltige Entwicklung der Gesellschaft. Die Fusionsforschung kann hier perspektivisch zum Handlungsfeld 1, der Vermeidung und Reduktion von Treibhausgasen, beitragen.

²⁵ **Zukunftsstrategie Forschung und Innovation der Bundesregierung.** In: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/forschung/zukunftsstrategie-forschung-innovation-2163454>

²⁶ **BMBF-Strategie zur Forschung für Nachhaltigkeit.** In: <https://www.fona.de/de/fona-strategie/>

- Vor allem für die Laserfusion muss die Laser- und Optikforschung für Hochleistungslasersysteme vorangetrieben werden. Berührungspunkte und Synergien ergeben sich daher auch mit dem Forschungsprogramm Quantensysteme²⁷ des BMBF, welches die Themenfelder Photonik und Quantentechnologien vereint.

Weitere Synergien sind mit folgenden BMBF-Programmen zu erwarten:

- Rahmenprogramm „Vom Material zur Innovation“²⁸ bzw. das „Eckpunktepapier zur Materialforschung“²⁹
- Forschungsprogramm „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit“³⁰
- Forschungsprogramm „Hoch- und Höchstleistungsrechnen für das digitale Zeitalter“³¹

Jenseits der rein technischen Ebene soll das Programm das Thema der Regulierung vorantreiben. Dafür ist die Zusammenarbeit mit weiteren Akteuren (privaten und staatlichen) und insbesondere der EU-Kommission geplant. Bezüglich eines Gesetzgebungsverfahrens auf nationaler Ebene sind weitere Ressorts der Bundesregierung einzubinden.

5.3 Erfolgskriterien

Erfolgsindikatoren für das Programm als Ganzes sollen zum Beispiel die Anzahl der erfolgreich durchgeführten Projekte, die Zahl neuer Kooperationen, oder die Erhöhung der TRLs der in Kapitel 3 beschriebenen Technologiebereichen bis hin zur Realisierung der ersten Demonstrationskraftwerke sein. Das übergeordnete Ziel eines wirtschaftlich rentablen Fusionskraftwerks mit Netzeinspeisung ist innerhalb der Laufzeit dieses Programms nicht geplant oder realistisch und bleibt Folgeaktivitäten vorbehalten (Phase II und III, vgl. Kapitel 2). Laser- und Magnetfusion haben zwar, wie aufgezeigt, an einigen Stellen einen technologischen Überlapp, können sich aber in den nächsten Jahren sehr unterschiedlich entwickeln und sind daher im Programmverlauf separat zu bewerten.

Zudem werden nachfolgend Erfolgsindikatoren für die in Kapitel 2 aufgeführten strategischen (Teil-)Ziele formuliert. Durch das Forschungsrisiko und nicht vorhersehbare wissenschaftlich-technische Durchbrüche, die auch die erforderlichen Maßnahmen beeinflussen können, sind diese jeweils als nicht abschließende Aufzählungen zu betrachten. Anpassungen können während der Laufzeit des Programms noch erfolgen.

²⁷ BMBF-Forschungsprogramm Quantensysteme. In: <https://www.quantentechnologien.de/>

²⁸ BMBF-Rahmenprogramm „Vom Material zur Innovation“. In: <https://www.werkstofftechnologien.de/>

²⁹ BMBF-Pressemitteilung. BMBF veröffentlicht Eckpunktepapier zur Materialforschung. In: <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/pressemitteilungen/de/2022/02/110222-Materialforschung.html>

³⁰ BMBF-Forschungsprogramm „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit“. In: <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/zukunft-der-wertschoepfung.html>

³¹ BMBF-Forschungsprogramm „Hoch- und Höchstleistungsrechnen für das digitale Zeitalter“. In: https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/digitale-wirtschaft-und-gesellschaft/supercomputing/supercomputing_node.html

Beitrag zur Energiesouveränität leisten

Durch die Umbrüche und die Transformation im Energiesystem ist die Sicherung der Energiesouveränität ein wesentlicher strategischer Aspekt in Bezug auf die Fusion. Indikatoren können künftig der Integrationsgrad und der Beitrag der Fusion zur Stromversorgung in Deutschland sein. Für das vorliegende Programm sind Indikatoren vor allem die Zahl der Patente und der aktiven Fusions-Unternehmen sowie die Vollständigkeit des Innovationsökosystems. Ein weiterer wichtiger Indikator ist der Fortschritt in der nationalen Regulierung der Technologie, die für die Nutzung der Fusion essenziell ist.

Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands stärken

Da die Verwertung der Ergebnisse der Fusionsforschung Fusion im Rahmen der Errichtung von Kraftwerken mit hoher Wahrscheinlichkeit noch nicht während der Laufzeit des vorliegenden Programms erfolgt, sind Indikatoren hier vor allem auf Teiltechnologien und Zweitverwertungen zu beziehen, also zum Beispiel die Anzahl von Produktinnovationen, die Performance beteiligter deutscher Unternehmen im weltweiten Vergleich sowie die jeweiligen Exportstatistiken spezieller Technologien. Für das deutsche Wirtschaftsmodell ist vor allem ein Impact in der Breite der Unternehmen relevant, also beispielsweise die Anzahl an kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU), die profitieren. Mit Blick auf den Aufbau eines Ökosystems soll die Anzahl von neuen Forschungsk Kooperationen und Abschlussarbeiten sowie die Fachkräfteausbildung insgesamt als Indikatoren genutzt werden.

Technologische Souveränität in der Fusion sichern

Für die Verfügbarkeit der Technologie sollen Indikatoren die Anzahl der in Deutschland aktiven Unternehmen in der Fusion, die Zahl der wissenschaftlichen Publikationen und Patente sein. Handelsbilanzen bezüglich einzelner Technologieklassen sind ein weiterer Indikator (Exportanteil am Weltmarkt). Ein wichtiger Faktor bei komplexen Technologien ist der Abdeckungsgrad bei Zuliefer- und Wertschöpfungsketten aus Deutschland oder zumindest aus der EU.

Chancen des technologischen Wandels für Wirtschaft und Gesellschaft nutzen

Indikatoren hier sind die Sichtbarkeit und Wahrnehmung der Technologie in der Öffentlichkeit, der Umfang der beteiligten Akteure aus Gesellschaft und Wirtschaft, aber auch die Anzahl der Anwendungen (auch Zweitverwertungen) mit gesellschaftlicher Relevanz, wie Klimaschutz, zivile Sicherheit, oder medizinische Versorgung.

5.4 Lernendes Programm und Evaluation

Aufgrund der aktuellen Dynamik sowie veränderlicher ökonomischer und technisch-wissenschaftlicher Rahmenbedingungen ist das Förderprogramm technologieoffen und als lernender Handlungsrahmen angelegt. Bekannte und neue Themenfelder der jeweiligen Fusionstechnologien werden laufend beobachtet und die jeweilige Ziel-, Aufgaben- und Prioritätensetzung aktualisiert. Die Schwerpunktsetzung bei Verfahren und Förderkriterien erfolgt in der Regel durch die Veröffentlichung von Förderthemen oder Wettbewerben in Form von Bekanntmachungen im Bundesanzeiger sowie deren Verbreitung im Internet auf den Seiten des BMBF. Durch Technologieanalysen sowie Fachgespräche werden die

Fördermaßnahmen dem tatsächlichen Entwicklungsstand in Wissenschaft und Wirtschaft laufend angepasst.

Für eine fortlaufende und übergeordnete Begleitung des Programms soll ein paritätisch aus Wirtschaft und Wissenschaft besetzter Beirat eingerichtet werden. Dieser wird das BMBF in regelmäßigen gemeinsamen Sitzungen über aktuelle wissenschaftlich-technische Entwicklungen und Trends informieren und zu gegebenenfalls notwendigen Anpassungen der Schwerpunktsetzung der Förderstrategie beraten. Eine Bewertung von oder Beratung zu einzelnen Projektvorschlägen erfolgt durch diesen Beirat aufgrund möglicher Interessenskonflikte nicht.

Durch Förderbekanntmachungen werden die Fördermodalitäten und -regularien verbindlich festgelegt und durch wettbewerbliche Auswahlverfahren wissenschaftliche Exzellenz und eine ausreichende Innovationshöhe sichergestellt. Abhängig vom jeweiligen Themenschwerpunkt lässt sich das BMBF gegebenenfalls bei der Projektauswahl ergänzend durch unabhängige Gutachter beraten.

Im Nachgang der Maßnahmen wird durch einen laufenden Dialog mit den Zielgruppen, das Monitoring von Förderdaten sowie die Nutzung von Informationen aus Projektberichten (wie die technologische Zielerreichung und Verwertungsperspektive) inklusive der Sicherstellung der Vollzugswirtschaftlichkeit eine fortlaufende Nachjustierung des Programms vorgenommen. Die Förderinstrumente werden entsprechend dem Programmverlauf geeignet ergänzt oder angepasst. Hierzu werden auch die zuvor beschriebenen Indikatoren herangezogen.

Diese beispielhaften Indikatoren bilden den Ausgangspunkt für eine Erfolgskontrolle auf Programmebene im Rahmen einer Zwischenevaluation nach fünf Jahren und einer Ex-Post-Evaluation nach Ende der Programmlaufzeit. Im Rahmen einer Wirkungsanalyse werden dabei die Programmziele sowie deren Zielerreichungsgrad bewertet und Handlungsempfehlungen für zukünftige Fördermaßnahmen auch in Bezug auf die nachfolgenden Phasen II und III (vgl. Kapitel 2) formuliert. Die Evaluation soll effiziente Prozessstrukturen aufzeigen und gegebenenfalls Optimierungsbedarf für die Zukunft offenlegen. Insgesamt wird in der Programmevaluation ein Methoden-Mix aus quantitativen als auch qualitativen Untersuchungsmethoden angestrebt wie beispielsweise ökonomische Ansätze, randomisierte Kontrollgruppenansätze, strukturierte/repräsentative Befragungen oder Experteninterviews. Die Sichtweise programminterner sowie programmexterner Akteure werden dabei berücksichtigt. Zu betonen ist, dass die Konzeption einer professionellen externen Evaluation (begleitend und ex-post) des Förderprogramms an dieser Stelle nicht vorweggenommen werden soll und kann. Die Expertise der externen Evaluatoren wird für die finale Definition der Indikatoren ausschlaggebend sein. Auf der Ebene der geförderten Projekte erfolgt eine Erfolgskontrolle bei der Prüfung des Verwendungsnachweises auf der Basis der für das jeweilige Vorhaben definierten Ziele sowie im Rahmen der nachfolgenden Verfolgung der Verwertungsaktivitäten im Anschluss an eine erfolgreiche Durchführung der Forschungsarbeiten. Besonderes Augenmerk wird dabei darauf gerichtet, in welchem Umfang die Ergebnisse der Forschungsarbeiten durch die in die Verbundprojekte involvierten Unternehmen für nachfolgende innovatorische Schritte aufgegriffen und in Wertschöpfung umgesetzt werden.

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium
für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat Fusionsforschung; Helmholtz-Zentren FZJ, HZB, HZDR
53170 Bonn

Stand

Februar 2024

Text

BMBF

Gestaltung (und Redaktion)

VDI Technologiezentrum GmbH

Bildnachweise

Titel: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Matthias Otte

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.