Fraunhofer Moonshot Innovation Brief

Kernfusion als Wegbereiter für eine resiliente Energieversorgung, disruptive Innovationen und Hightech-Wachstum

Schlüsseltechnologien: Klimaneutrale Energieversorgung

Executive Summary

Die Kernfusion zeichnet sich durch ihre Resilienz als Energiequelle aus, da sie eine nahezu unbegrenzte und emissionsfreie Energieversorgung unabhängig von externen Faktoren wie Wetterbedingungen, Tageszeit oder jahreszeitlichen Schwankungen ermöglicht. Die vom damaligen BMBF beauftragte internationale Expertenkommission für Inertial Fusion Energy (IFE) betont neben der langfristigen Perspektive für die Energieversorgung auch die strategische Bedeutung der Technologieentwicklung für die Wirtschaft und Innovationskraft Deutschlands. Jüngst wurde in den USA ein Meilenstein erreicht: Erstmals konnte durch die Laserträgheitsfusion ein selbsttragendes (brennendes) Plasma erzeugt werden, dass mehr Energie abgab, als durch die Laser eingetragen wurde. Dieser Erfolg belegt die physikalische Machbarkeit der kontrollierten Laserfusion und differenziert sie eindeutig von anderen Fusionsansätzen, die bislang keine Energiegewinnbringende Zündung demonstriert haben.

In der Magnetfusion, einem grundsätzlich anderen Ansatz, wurden ebenfalls bedeutende Fortschritte bei der Beherrschung heißer Plasmen erzielt. Mit dem Stellarator W7-X in Greifswald wurde ein fortschrittliches Reaktordesign erfolgreich umgesetzt, das den stabilen und effizienten Einschluss von Plasmen über längere Zeiträume demonstriert. Diese Erfolge basieren neben der Grundlagenforschung unter anderem auf deutschen Schlüsseltechnologien wie Fertigungstechnik, Supraleitendem Spulenbau, Lasertechnik, Diamantbasierten Targets, Materialphysik, Plasmadiagnostik sowie präziser Modellierung und Simulation.

Die Spill-over-Effekte der Fusionsforschung schaffen bereits heute Wertschöpfung: Hochleistungslaser, Directed Energy, Präzisionstechnik und moderne Fertigungs- sowie Sensorsysteme profitieren direkt. Diese Technologien stärken Industrien, schaffen Arbeitsplätze und eröffnen Exportpotentiale für Hochtechnologie »Made in Germany«. Ein globaler Technologiewettlauf hat begonnen, mit Milliardeninvestitionen weltweit. Deutschland muss handeln, um technologische Führungspositionen zu halten und durch gezielte Förderung Wertschöpfung, Technologietransfer und internationale Wettbewerbsfähigkeit zu sichern. Vernetzte Technologie-Hubs sind entscheidend, um Forschung und Industrie effizient zusammenzubringen und Anwendungen zu skalieren.

1. Wertschöpfung

Durch Forschung zur Kernfusion entsteht Deep Tech zur Beherrschung physikalischer Grenzbereiche bei der Herstellung von Werkstoffen, Komponenten und Systemen, besonders in den Technologiebereichen Lasertechnik und Optik, Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik, Sensorik und Steuerungstechnik sowie Hochfeldmagnete und Supraleitung. Spill-over-Effekte in weitere Zukunftsbranchen wie z. B. der Luft- und Raumfahrt, Wehrtechnik und Medizintechnik sind unmittelbar innerhalb von wenigen Jahren spürbar. Langfristig ist die Kernfusion der entscheidende und CO_2-neutrale Enabler für die energieintensive Industrie zur strategischen Grundstoffversorgung in offenen und geschlossenen Stoffkreisläufen wie z. B. bei der Erzeugung von Wasserstoff und seiner Derivate, Sekundärkreisläufen von Werkstoffen oder der »Carbon Capture and Storage«-Technologie (CCS). Damit kann die Kernfusion entscheidende

Beiträge für die technologische und wirtschaftliche Souveränität leisten.

2. Status quo und Handlungsbedarf

Die technologischen Durchbrüche haben bewirkt, dass die Kernfusion international aus den staatlichen Forschungslaboren über Start-ups das Interesse des Kapitalmarkts gefunden hat. Damit sind die Voraussetzungen für ein zügiges Entwickeln von Public-Private-Partnerships gegeben, um den nächsten Meilenstein – einen funktionsfähigen energieliefernden Prototyp — innerhalb der nächsten zwei Dekaden zu erreichen. Dafür sind eine Parallelisierung und Vernetzung von Grundlagenforschung, angewandter Forschung der Fraunhofer-Gesellschaft, Start-ups und Industrieunternehmen zum Aufbau einer skalierbaren, souveränen industriellen Supply Chain notwendig. Der Staat muss dabei eine aktive Rolle übernehmen: als Ankerkunde, um Technologien marktfähig zu machen, und durch gezielte Förderung von Kooperationen zwischen Forschung und Industrie. Hochrisikoprojekte und sogenannte Moonshots, die hohe Entwicklungskosten und Risiken mit sich bringen, sollten staatlich getragen werden, um private Investitionen zu erleichtern und die Entwicklung zu beschleunigen.

3. Fraunhofer-Beiträge zu Fokusthemen

Fokusthema Material- und Produktionstechnik

Die Auslegung, Qualifizierung, Herstellung, wirtschaftliche Skalierung und Instandhaltung von Schlüsselkomponenten sind entscheidend für die Realisierung eines Fusionskraftwerks. Speziell für Anforderungen, die aus dem Dauerbetrieb eines Kraftwerks resultieren, sowie für die benötigen Komponentengrößen müssen neue Materialkonzepte entwickelt und deren effiziente Skalierung entlang der Prozesskette der Komponentenfertigung betrachtet werden. Dabei sollte sich auf folgende Schwerpunkte fokussiert werden:

- Plasma-Facing Components (First Wall, Divertor-Materialien, Wartung/Wechsel)
- Tritium-Zyklus (Brutmaterialien, Abscheidung, Tritium-Leckdichtigkeit)
- Strahlungsresiliente Sensorik (Remote Handling, Plasmamonitoring)

Dabei sollen folgende Ziele verfolgt werden:

- Schaffung einer simulativ experimentellen Datengrundlage für die tatsächlichen Belastungsparameter im Fusionsprozess zur KI-gestützten Hochdurchsatzratenentwicklung von Werkstoffen
- Stückzahl-, geometrie- und dimensionsflexible Fertigungstechnologien
- Testinfrastrukturen für Lebensdauertuntersuchungen an generischen Prototypen bei multipler Belastung

Daraus resultieren USP für die deutsche Industrie in den Bereichen:

- Simulationsgestütztes Legierungsdesign für Hochleistungswerkstoffe im Bereich der Mehrfeldbeanspruchung (Thermomechanisch, elektromagnetische Strahlung in breitem Wellenlängenbereich, Teilchenstrahlung) -> Beispiel für Spill-over-Effekt – Nutzung im Bereich Wehrtechnik innerhalb der nächsten fünf Jahre
- Infrastruktur zur Werkstoffprüfung unter Einsatzbedingungen in kooperativer Nutzung im Ökosystem -> Voraussetzung für die Genehmigungsfähigkeit
- Infrastruktur und Kompetenzen im Design sowie Ver- bzw. Bearbeitung von relevanten Werkstoffen zur Herstellung von Fusionskomponenten -> direkter Transfer in den innovativen Mittelstand; direkte Beförderung der Reifegrade der Forschungsinfrastruktur der Fusionsforschung

Fokusthema hochrepetierende Hochenergielasersysteme für die Laserfusion

Wir empfehlen die Gründung eines Moonshot--Projekts **PhotonForge**, also ein Joint Venture Exzellenzhub, der die besten Expertinnen und Experten aus Deutschland – von Fraunhofer-Instituten, Helmholtz- und Max-Planck-Gesellschaften, Universitäten sowie der Photonik-Industrie – zusammenführt. Dieser Hub würde durch seine Strahlkraft auch international führende Talente anziehen und eine Plattform für bahnbrechende Innovationen in der Hochenergielasertechnologie schaffen. Ziel ist es, durch koordinierte Spitzenforschung und gezielte Investitionen in die Infrastruktur Deutschlands Führungsrolle in der Laserfusion zu sichern und auszubauen.

Die Entwicklung hochrepetierender Hochenergie-Lasersysteme (HELS) mit den notwendigen Pulsenergien, Wiederholraten und Wirkungsgraden stellt eine der größten technologischen Herausforderungen dar und ist eine kritische Schlüsseltechnologie für die Laserfusion. Ohne leistungsfähige und bezahlbare Laser kein Fusionskraftwerk. Kritische Komponenten wie Frequenzkonverter, High-Brightness-Laserdioden und Großapertur-Pockelszellen sind bisher nicht verfügbar, und die effiziente Wärmeabfuhr sowie die Belastbarkeit optischer Elemente müssen dringend zur Anwendung reifen.

Ein koordinierter Hub vereint die Kompetenzen der deutschen Forschung und Industrie, um diese Herausforderungen effizient anzugehen. Der Staat sollte dabei

als **Ankerkunde** auftreten und die nötigen **nichtnicht-wiederkehrenden Entwicklungskosten (NRE)** für riskante, technologisch transformative Forschung übernehmen.

Vision: Zwei weltweit führende Lasersysteme in drei bis fünf Jahren

Das Ziel des Exzellenzhubs ist die Entwicklung von **zwei HELS-Prototypen und der Demonstration kritischer Laserelemente**, die folgende Meilensteine erreichen:

- **Leistungssteigerung um eine Größenordnung**: Pulsenergien bis 10 kJ und hohe Wiederholraten (~20 Hz), einer WPE>8 Prozent, Prozent, mit deutlichem Vorsprung gegenüber dem Stand der Technik
- **Beschleunigter Lebensdauerprüfstand** für Belastungs- und Zuverlässigkeitsuntersuchungen von Laserkomponenten, um neue Standards zu schaffen und systemische Betriebs-Expertise beim Umgang mit Höchstleistungslasern aufzubauen
- Demonstration **innovativer Schlüsselkomponenten**: Großapertur-Pockelszellen und Frequenzkonverter in den UV-Bereich, optische Isolatoren für Multi-kJ- und Multi-kW-Systeme und die Wärmeabführung aus kritischen optischen Bauelementen
- **Entwicklung von optischen Fertigungstechnologien** für Hochratendurchsatz von Optiken für den Einsatz in HELS

Diese Systeme wären nicht nur ein technologischer Durchbruch für die Laserfusion, sondern auch ein Treiber für die deutsche Laser- und Photonikindustrie, mit Anwendungen in Energie, Raumfahrt, Verteidigung und weiteren Schlüsselbranchen.

Deutschland verfügt über weltweit führende Kompetenzen in der Lasertechnologie und Photonik. Fraunhofer-Institute sind international anerkannt für ihre Fähigkeit, technologische Durchbrüche in industrielle Anwendungen zu überführen. In Kombination mit den Grundlagenforschungskapazitäten von Helmholtz-Gemeinschaft und Max-Planck-Gesellschaft sowie der Innovationskraft der mittelständischen Photonikindustrie ergibt sich ein einzigartiges Ökosystem für disruptive Forschung und Entwicklung.

Diese PhotonForge-Initiative würde

- die deutsche Photonikindustrie durch technologische Führerschaft in einem entscheidenden Zukunftsmarkt stärken und dem internationalen Wettbewerb mit Stärke begegnen,
- Wertschöpfung und Arbeitsplätze in diesem Hochtechnologiebereich sichern, der Deutschland seit den 80er Jahren geprägt hat und in dem Deutschland noch führend ist,
- internationale Spitzenforscherinnen und -forscher anziehen und so Deutschlands Innovationskraft weiter steigern.

Strategische Investition in die Zukunft

Der Aufbau eines Laser-Moonshot--Exzellenzhubs erfordert gezielte Investitionen in Infrastruktur wie Belastungstester und Plattformen für die Entwicklung und Bewertung von Systemkomponenten. Dies ist eine strategische Maßnahme, um Deutschlands technologische Führungsrolle zu festigen und die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit in Schlüsselbereichen wie der Laserfusion und darüber hinaus nachhaltig zu steigern. Damit kann die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen, von mittelständischen Unternehmen geprägten Photonikindustrie durch folgende USPs gesteigert werden:

- Erweiterung der Kombination von Pulsenergie bei hoher mittlerer Leistung um mindestens eine Größenordnung gegenüber dem Stand der Technik innerhalb der nächsten fünf Jahre
- Erstmalige systematische Untersuchung der Lebensdauer/Belastbarkeit der Komponenten
- Entwicklung relevanter Systemkomponenten, insbesondere effiziente Kühlsysteme, Diagnostik- sowie Ansteuerungs- und Regelungssysteme
- Erstmalige Demonstration einer Großapertur-Pockelszelle für Pulsenergien über 100 Joule bei hoher Repetitionsrate 10…100Hz
- erstmalige Untersuchung optischer Isolatoren im relevanten Energie- und Leistungsbereich (>100J und >1…10kW)
- Robuste, hochbelastbare optomechanische Komponenten

Akzeptanzpfade und Zukunftsszenarien

Das Vorhaben adressiert das Risiko eines Akzeptanzdefizits und macht dessen frühzeitige Bearbeitung zu einem strategischen Vorteil. Ziel ist ein neuer Standard für die technologie- und innovationspolitische Gestaltung in Deutschland.

Indem es Technologieetablierung und gesellschaftliche Perspektiven frühzeitig und systematisch verknüpft, schafft das Projekt langfristige Planungssicherheit für Forschung, Entwicklung und Investitionen. Im Innovationsökosystem werden Forschungspartner in der Fusionsforschung, Industrie

und Start-ups, Bundesämter/Behörden und zivilgesellschaftliche Akteure in die Dialog- und Szenarioprozesse eingebunden. Schlüsselakteure aus Forschung, Industrie und Politik begleiten das Projekt über die gesamte Laufzeit.

4. Finanzvolumen und Förderformate

Für die Umsetzung wird ein Finanzvolumen von ca. 300 Mio. € über einen Zeitraum von minimal fünf und maximal siebensieben Jahren als angemessen und effizient umsetzbar eingeschätzt. Dabei sollten ca. 100 Mio. € als Forschungsinfrastruktur der angewandten Forschung investiert werden, ca. 30 Mio. € für den Betrieb über fünf Jahre, ca. 60 Mio. € ermöglichen eine effiziente Transfervorbereitung durch strukturierte angewandte Forschung und 110 Mio. € sollten zur direkten Transferetablierung durch Verbundprojekte mit Industrie eingesetzt werden.

Über die Fraunhofer-Gesellschaft

Die Fraunhofer-Gesellschaft mit Sitz in Deutschland ist eine der führenden Organisationen für anwendungsorientierte Forschung. Im Innovationsprozess spielt sie eine zentrale Rolle – mit Forschungsschwerpunkten in zukunftsrelevanten Schlüsseltechnologien und dem Transfer von Forschungsergebnissen in die Industrie zur Stärkung unseres Wirtschaftsstandorts und zum Wohle unserer Gesellschaft. Seit ihrer Gründung als gemeinnütziger Verein im Jahr 1949 nimmt sie eine einzigartige Position im Wissenschafts- und Innovationssystem ein.

Knapp 32 000 Mitarbeitende an 75 Instituten und selbstständigen Forschungseinrichtungen in Deutschland erarbeiten das jährliche Finanzvolumen von 3,6 Mrd. €. Davon entfallen 3,1 Mrd. € auf das zentrale Geschäftsmodell von Fraunhofer, die Vertragsforschung. Im Vergleich zu anderen öffentlichen Forschungseinrichtungen bildet die Grundfinanzierung durch Bund und Länder lediglich das Fundament des jährlichen Forschungshaushalts. Sie ist die Basis für wegweisende Vorlaufforschung, die in den kommenden Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft bedeutend wird. Das entscheidende Alleinstellungsmerkmal ist der hohe Anteil an Wirtschaftserträgen, der Garant ist für die enge Zusammenarbeit mit Wirtschaft und Industrie und die stetige Marktorientierung der Fraunhofer-Forschung: 2024 beliefen sich die Wirtschaftserträge auf 867 Mio. € des laufenden Haushalts. Ergänzt wird das Forschungsportfolio durch im Wettbewerb eingeworbene öffentliche Projektmittel, wobei eine ausgewogene Balance zwischen öffentlichen und wirtschaftlichen Erträgen angestrebt wird.

Kontakt

Herausgeber
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V.
Hansastraße 27 c, 80686 München
https://www.fraunhofer.de

Ansprechpersonen
Prof. Dr. Constantin Häfner
Vorstand für Forschung und Transfer
Constantin.haefner@zv.fraunhofer.de

Prof. Dr. Christoph Herrmann
Vorsitzender des Fraunhofer-Verbunds Produktion
Christoph.herrmann@ist.fraunhofer.de

© Fraunhofer-Gesellschaft e. V., München 2025