

Wettbewerbsfaktor

Die Rolle der Kernfusion im Energiesystem der Zukunft



Aktueller Stand

Energie ist von entscheidender Bedeutung für den Wohlstand und die globale Wettbewerbsfähigkeit eines Landes. In Deutschland wird der Strombedarf bis 2050 durch Elektrifizierung voraussichtlich auf das Dreifache ansteigen, ähnlich wie in anderen Industrieländern. Die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffimporten kann durch Photovoltaik und Windkraft mit Energiespeichern verringert werden. Dennoch bleibt Deutschland auch nach der Energiewende auf Energieimporte angewiesen. Kernfusion bietet als umweltfreundliche Energiequelle das Potenzial, im Grundlastbetrieb zur Energieversorgung beizutragen und die Resilienz des Energiesystems zu erhöhen, Prozesswärme zu erzeugen und Power-to-X-Anwendungen zu ermöglichen. Ein Einsatz der Fusionsenergie ist frühestens ab 2050 realistisch. Dennoch erwarten wir durch die fortschreitende Technologieentwicklung signifikante Spill-over-Effekte für den deutschen Hightech-Markt. Deutschland ist weltweit führend in der Fusionstechnik und -grundlagenforschung, was das Potenzial dieser Technologie zu einem potenziellen Erfolgsträger erhebt.

Unsere forschungspolitischen Empfehlungen

» Unsere Empfehlungen im Fokus

- **Entwicklung einer Meilenstein-basierten Fusionsroadmap**, die Kraftwerksprototypen als Zwischenziel und ein wirtschaftlich tragfähiges Kraftwerk ohne Subventionen als finales Ziel definiert. Stetige Evaluierung und Anpassung der Meilensteine ist erforderlich.
- **Einführung eines eigenständigen Rechtsrahmens** für Fusionstechnologien, um Rechtssicherheit zu schaffen, Innovationen zu fördern und private Investitionen anzuziehen.
- **Intensivierung der internationalen Zusammenarbeit** durch gemeinsame Standards, Harmonisierung regulatorischer Rahmenbedingungen und Abbau von Hürden beim Technologietransfer.
- **Förderung der Standardisierung**, um Interoperabilität und den Aufbau eines globalen Marktes für Fusionstechnologie zu ermöglichen.
- **Einrichtung von Kernfusions-Hubs**, die als zentrale Knotenpunkte Innovation beschleunigen, Start-ups fördern, internationale Netzwerke aufbauen und Ressourcen bündeln.
- **Auf- und Ausbau moderner Forschungsinfrastrukturen**, insbesondere in den Bereichen lasergetriebene Trägheitsfusionsenergie (IFE) und Materialforschung, unter enger Einbindung der Industrie.
- Förderung von Start-ups und Schaffung steuerlicher Anreize, um ein attraktives Investitionsklima zu schaffen.
- **Ausbildung der nächsten Generation von Forschenden** durch spezialisierte Studiengänge, Zertifizierungen und internationale Austauschprogramme.

» Im Fokus: Potenziale der Kernfusion für die Energiezukunft und technische Herausforderungen

Der globale Wettlauf um die Energieversorgung der Zukunft nimmt Fahrt auf. Die Kernfusion, die die Kraft der Verschmelzung von Wasserstoffisotopen nutzt, verspricht eine nahezu unerschöpfliche, saubere und sichere Energiequelle, für die keine Energiespeicher erforderlich sind. Im Gegensatz zu erneuerbaren Energiequellen, die aufgrund von Wetterbedingungen starken Schwankungen unterliegen, können Fusionskraftwerke nahezu kontinuierlich betrieben werden. Durch ihre Grundlastfähigkeit sind sie ein idealer Ergänzungsbaustein für ein stabiles Stromnetz, erhöhen die Resilienz des Energienetzes und stärken die Energiesouveränität. In Zeiten hoher Stromerzeugung durch Photovoltaik und Windkraft kann überschüssiger Strom aus Fusionskraftwerken zur Produktion von Wasserstoff oder anderen synthetischen Kraftstoffen genutzt werden. Diese Integration von Fusionskraftwerken ins Energiesystem ermöglicht eine effizientere Sektorenkopplung.

Allerdings wird die technische Realisierung der Energiegewinnung aus der Fusion aufgrund ihrer extremen Komplexität noch etwa 20 bis 25 Jahre in Anspruch nehmen. Um eine Fusionsreaktion zu initiieren, muss ein Plasma auf über 100 Millionen Grad Celsius erhitzt und für längere Zeit mittels Magnetfeldern (Magnetfusion, MFE) oder durch seine eigene Trägheit (Trägheitsfusion, IFE) bei den erforderlichen Dichten gehalten werden. Bisher konzentrierte sich die weltweite Forschung hauptsächlich auf die Grundlagenforschung, um diese Bedingungen zu erreichen.

Das Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) erzielte im Dezember 2022 einen bedeutenden Durchbruch in der lasergetriebenen Trägheitsfusion, indem es erstmals einen Nettoenergiegewinn in einem Fusionsprozess demonstrierte. Dieser Durchbruch, bekannt als Zündung, wurde mehrfach wiederholt und markiert einen historischen Meilenstein für die lasergetriebene Fusionsforschung, der die physikalische Machbarkeit der IFE bestätigt. Während für die Magnetfusion ein äquivalenter Nachweis noch aussteht, wurden erhebliche Fortschritte im stabilen Betrieb von Tokamaks und Stelleratoren gemacht. Auch wenn sich die sehr unterschiedlichen Ansätze von MFE und IFE nur schwer vergleichen lassen, so sind MFE als auch IFE etwa auf gleichem Entwicklungsstand auf dem Weg zum Fusionskraftwerk.

» Im Fokus: Deutschlands Stärken in der Fusionsforschung

Deutschland hat sich als führende Nation in der internationalen Magnetfusionsforschung etabliert. Dies ist auf langfristige Grundlagenforschung und exzellente Forschungsinfrastrukturen wie den Tokamak ASDEX-Upgrade und den einzigartigen Stellarator Wendelstein 7-X zurückzuführen. Zudem ist Deutschland aktives Mitglied des europäischen Fusionskonsortiums EUROfusion und beteiligt sich am Bau des internationalen Fusionsreaktors ITER. Neben der grundlagenorientierten Plasmaforschung ist Deutschland auch führend in der Entwicklung wichtiger Schlüsseltechnologien wie Tritium-Brennstoffkreislauf, hitzebeständige Reaktorwände und Hochleistungs-Mikrowellenröhren (Gyrotrons) zur Plasmaheizung. Diese Kombination aus innovativer Forschung und herausragender Infrastruktur unterstreicht die zentrale Rolle Deutschlands in der globalen Fusionsforschung.

Während Deutschland sich historisch stärker auf die Magnetfusion konzentriert hat, leistete es auch bedeutende Beiträge zur Trägheitsfusion. Deutsche Unternehmen sind weltweit führend in der Entwicklung von Hochleistungslasern und -optiken, essenziellen Komponenten für die IFE. Deutsche Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen sind international führend in der Forschung zur hochintensiven Laser-Materie-Wechselwirkung und betreiben kleinere Forschungsinfrastrukturen in diesem Bereich.

» Im Fokus: Deutschlands Weg zur globalen Technologieführerschaft in der Kernfusion

Die jüngsten Durchbrüche in der Fusionsforschung haben einen globalen Wettlauf um die technologische Vorherrschaft entfacht. Länder wie China und die USA investieren massiv in diese Zukunftstechnologie, da sie erkennen, dass die Beherrschung der Kernfusion nicht nur die Energieversorgung revolutionieren, sondern auch neue Industrien schaffen und die geopolitische Landschaft nachhaltig verändern wird. Über 50 Start-ups weltweit und über 8 Milliarden Euro an privaten Investitionen in den letzten Jahren belegen das Vertrauen der Investoren in diese Technologie. Deutschland mit seiner soliden Forschungsbasis und einer starken Industrie könnte von dieser Entwicklung enorm profitieren. Eine erfolgreiche Entwicklung der

Fusionsenergie würde nicht nur die Energieversorgung sichern, sondern auch neue Arbeitsplätze in zukunftsträchtigen Technologien schaffen und Deutschland zu einem globalen Technologieführer machen. Um diese Chancen zu nutzen, muss Deutschland seine Investitionen in die Fusionsforschung deutlich erhöhen und die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Wirtschaft intensivieren.

Um Deutschland eine führende Rolle im globalen Wettlauf um die Fusionsenergie zu sichern, hat die Bundesregierung die Initiative »Fusion 2040« gestartet. Mit diesem Programm werden gezielt Unternehmen und Start-ups in die Fusionsforschung eingebunden, um ein robustes Innovationsecosystem aufzubauen. Die Fraunhofer-Gesellschaft, als Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Wirtschaft, spielt hierbei eine zentrale Rolle. Durch die Förderung von Verbundprojekten und die Organisation von Netzwerktreffen wie dem Fraunhofer Industrietag Kernfusion 2024 wird der Technologietransfer beschleunigt und die Entwicklung innovativer Lösungen für die Herausforderungen der Fusionsenergie vorangetrieben.

Hierfür empfiehlt die Fraunhofer-Gesellschaft die **Entwicklung einer meilenstein-basierten Fusionsroadmap**, die als Zwischenziel Kraftwerksprototypen bzw. als finales Ziel ein sich ohne Subventionen tragendes Kraftwerk hat und deren Meilensteine und Planungen stetig evaluiert und nachgehalten werden.

Angesichts der spezifischen Anforderungen der Fusionstechnologie bedarf es eines **eigenständigen Rechtsrahmens**. Dieser sollte Rechtssicherheit schaffen, Innovationen fördern und private Investitionen anziehen, um Deutschland als führenden Standort für die Fusionsforschung zu positionieren.

Eine **intensivere internationale Zusammenarbeit in der Fusionsforschung**, einschließlich der **Entwicklung gemeinsamer Standards**, der **Harmonisierung von regulatorischen Rahmenbedingungen** und des **Abbaus von Hürden beim Technologietransfer**, ist entscheidend, um Synergien zu nutzen, redundante Entwicklungen zu vermeiden und die Entwicklung effizienter Fusionskraftwerke zu beschleunigen. Die Standardisierung fördert die Interoperabilität von Anlagen und Komponenten, erleichtert so die internationale Zusammenarbeit und schafft die Grundlage für einen globalen Markt für Fusionstechnologie.

Die Fraunhofer-Gesellschaft empfiehlt die Einrichtung von institutionsübergreifenden **Kernfusions-Hubs** mit systemischen Technologieschwerpunkten. Diese Hubs sollen

als zentrale Knotenpunkte dienen, um relevante Akteure aus Wissenschaft, Industrie und Politik zusammenzubringen, innerhalb kurzer Wege Innovation zu beschleunigen und Forschungsinfrastrukturen und Testcenter gemeinsam und effektiv zu nutzen. Die Hubs können zudem als **Inkubatoren für Start-ups** dienen, **Netzwerke zu internationalen Forschungszentren** aufbauen, **Wissenschaftler, Ingenieurinnen und Fachkräfte ausbilden, internationales Talent anziehen** und ein effizientes Wissensmanagement etablieren. Durch die Bündelung von Projekten, Ressourcen und Wissen kann Deutschland seine Rolle im globalen Wettbewerb um Fusionsenergie stärken und internationale Forschungsaktivitäten effektiv mitgestalten.

Um die technologische Entwicklung voranzutreiben und international wettbewerbsfähig zu bleiben, ist der zügige **Auf- und Ausbau moderner Forschungsinfrastrukturen** dringend erforderlich. Insbesondere die **Lasergetriebene IFE** und die **Materialforschung**, die für beide Fusionsansätze von zentraler Bedeutung **sind, müssen gestärkt werden**. Dabei muss eine **enge Zusammenarbeit zwischen öffentlicher Forschung und Industrie** angestrebt werden, um nicht nur die Industrie frühzeitig einzubeziehen, sondern Investitionen zu hebeln und Deutschland als Standort für die Fusionsforschung zu positionieren.

Um die Entwicklung von Fusionstechnologien zu beschleunigen, schlagen wir vor, die **Zusammenarbeit zwischen Forschungseinrichtungen und Unternehmen zu intensivieren** und durch **steuerliche Anreize sowie die Förderung von Start-ups** ein attraktives Investitionsklima zu schaffen.

Ein wichtiger Fokus sollte auf die **Ausbildung der nächsten Generation von Forschenden in der Fusionsforschung** gelegt werden. Interdisziplinäre spezialisierte Studiengänge, Zertifizierungsprogramme sowie internationale Austausch- und Ausbildungsinitiativen sind von großer Bedeutung, um eine qualifizierte Ingenieurs-, Wissenschafts- und Fachkräftebasis zu schaffen und die Innovationskraft im Bereich der Fusionsenergie weiter auszubauen.

Die Fraunhofer-Gesellschaft geht davon aus, dass Fusionskraftwerke durch die technischen Herausforderungen erst langfristig zur Deckung des Energiebedarfs beitragen können und die Transformation des Energiesystems in den nächsten 15 bis 20 Jahren auf einem schnellen Ausbau heute bereits entwickelter Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien basieren wird. Dennoch bietet die

Fusion für die Energieerzeugung ein großes Potenzial, dessen Erschließung durch aktuelle wissenschaftliche Fortschritte näher rückt und nur im Schulterschluss von akademischer, angewandter und industrieller Forschung effizient und zielgerichtet gehoben werden kann. Die Transformation der Fusionstechnologie von experimentellen Labortests zu marktfähigen Lösungen signalisiert bahnbrechende Möglichkeiten für Investoren, Unternehmen und Forschungseinrichtungen. Über die Energieproduktion hinaus schafft Kernfusion durch Schlüsseltechnologien für Fusionskraftwerke neue Marktsegmente und treibt **Spill-over-Technologien** voran, die das Potenzial haben, diverse Industriezweige grundlegend zu verändern. Fraunhofer steht hier als erfahrener Partner bereit. Die Weiterentwicklung der Fusionstechnologie erfordert bahnbrechende Innovation, die tief in der deutschen Identität als Hightech-Land verankert sind. Deutschland hat jetzt die Chance, durch entschlossenes und zügiges Handeln technologischer Vorreiter im Bereich der Fusionstechnologien zu werden und sich im weltweiten Wettbewerb gut zu positionieren.

Schnittstellen

	Innovative Gesundheitsforschung	Circular Economy	Zukunftsfähige Wasserversorgung	Energiesystem der Zukunft	Leistungsfähige und nachhaltige Mobilitätswirtschaft	Digitaler Industriestandort	Cybersicherheit	Quantentechnologien	Verteidigungsforschung in der Zeitenwende	Luft- und Raumfahrt	ZukunftsMissionBau. Sicher.nachhaltig.bezahlbar.
● Hauptbezug											
○ Nebenbezug											
Innovative Gesundheitsforschung	●					○					
Circular Economy		●	○	○	○	○				○	○
Zukunftsfähige Wasserversorgung		○	●			○					
Energiesystem der Zukunft		○		●	○	○				○	○
Leistungsfähige und nachhaltige Mobilitätswirtschaft		○		○	●	○				○	
Digitaler Industriestandort	○	○	○	○	○	●	○	○	○		○
Cybersicherheit						○	●	○			
Quantentechnologien						○	○	●			
Verteidigungsforschung in der Zeitenwende						○			●	○	
Luft- und Raumfahrt		○		○	○				○	●	
ZukunftsMissionBau. Sicher.nachhaltig.bezahlbar.		○		○		○					●

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.

Die 1949 gegründete Organisation betreibt in Deutschland derzeit 76 Institute und Forschungseinrichtungen. Die gegenwärtig knapp 32 000 Mitarbeitenden, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Finanzvolumen von 3,4 Mrd. €. Davon fallen 3,0 Mrd. € auf den Bereich Vertragsforschung.

Kontakt

Herausgeber

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V.
Im Auftrag des Vorstands
Hansastraße 27 c, 80686 München
<https://www.fraunhofer.de>

Ansprechperson

Dr. Simon Kapitza
Zentrale der Fraunhofer-Gesellschaft, Abteilung Wissenschaftspolitik
Telefon: +49 30 688 3759-1607
E-Mail: pierre.prasuhn@zv.fraunhofer.de

© Fraunhofer-Gesellschaft e. V., München 2024

Verzeichnis der Mitwirkenden

Prof. Dr. Constantin Häfner

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

Claudia Keibler-Willner

Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

Dr. Annkatrin Sommer

Zentrale der Fraunhofer-Gesellschaft