

Öffentliche Anhörung des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung zum Thema - „Fusionsforschung“

- Stellungnahme Prof. Häfner und Prof. Quay, Fraunhofer Gesellschaft -

Anhörung des Ausschusses am 27. September 2023 zum Antrag der Fraktion der CDU/CSU „Stärkung der Fusionsforschung auf Weltklassenniveau“, Bundestagsdrucksache 20/6907

Sehr geehrter Ausschussvorsitzender Gehring,

sehr geehrte Ausschussmitglieder,

die Fraunhofer-Gesellschaft spricht sich deutlich für die Förderung der Fusionsforschung durch die deutsche Regierung aus. Dies wird nicht nur aufgrund des langfristigen Potenzials der Energiegewinnung aus Kernfusion gesehen, einen bedeutenden Beitrag zur Energieversorgung des Landes zu leisten und die Resilienz zu stärken, sondern auch um die Hochtechnologieentwicklung voranzutreiben und die langfristige Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Gesellschaft in strategisch wichtigen Technologiebereichen sicherzustellen. In der Tat gibt es bereits in den USA, China, Korea, Japan und dem Vereinigten Königreich seit langem erhebliche Investitionen aus öffentlicher Hand für die Fusionsforschung. Eine frühzeitige und robuste Investition in die Fusionsforschung ist von entscheidender Bedeutung, um potenzielle Abhängigkeiten zu vermeiden und eine führende Position in der Wertschöpfung aus Fusionstechnologien zu erreichen.

Potential der Fusionsforschung in der nationalen und globalen Energieversorgung:

- Laut wissenschaftlichen Schätzungen wird der weltweite Energiebedarf bis 2050 voraussichtlich um bis zu 30 Prozent steigen, wobei Elektrizität als dominierende Form von Energie fungiert. Auch in Deutschland wird erwartet, dass der Strombedarf im Vergleich zu 2020 verdoppelt oder sogar verdreifacht wird. Auf der anderen Seite geht die Fraunhofer-Gesellschaft davon aus, dass Fusionskraftwerke durch die langfristigen Entwicklungsaufgaben erst in der zweiten Jahrhunderthälfte wirksam werden und die jetzige Transformation des Energiesystems in den nächsten 10 bis 15 Jahren auf heute bereits entwickelten Technologien wie Photovoltaik und Windenergie basieren wird.
- Die Energiegewinnung aus Fusion könnte langfristig eine kontinuierliche Grundlastkapazität bereitstellen, was aufgrund der technischen Komplexität und hohen Investitionskosten einen 24/7 Betrieb erfordern würde. Die preisgünstige Nutzung von Fusionsstrom zur Produktion von Energieträgern wie Wasserstoff oder Ammoniak könnte in Regionen eingesetzt werden, in denen direkte Elektrifizierung nicht realisierbar oder zu teuer ist. Fusionskraftwerke könnten auch den erheblichen Energiebedarf für die Elektrolyse decken und zur Entsalzung von Meerwasser für die Trinkwassergewinnung beitragen. Dadurch hätte die Energiegewinnung aus Fusion das Potenzial, nicht nur die Energieversorgung in Deutschland langfristig zu sichern und resilient zu machen, sondern auch deutsche Schlüsseltechnologien international zu begehrten Produkten zu machen und zusätzliche Erträge für die deutsche Industrie zu generieren.

Positionierung Deutschlands in der Fusionsforschung

Die wissenschaftlichen Fortschritte im Bereich der Laser-Trägheitsfusion haben in jüngster Zeit zu einer verstärkten internationalen Aufmerksamkeit für die Fusionsforschung geführt und das Interesse privater Unternehmen geweckt. Tatsächlich ist Deutschland aktuell sehr gut positioniert:

- **Magnetfusion:** Deutschland hat umfangreiche Erfahrung im Bau und Betrieb von Tokamak Fusionsreaktoren im Vergleich zu anderen Ländern. Dies gründet sich unter anderem durch die aktive und kontinuierliche Förderung der Grundlagenforschung seit Jahrzehnten in diesem Bereich. So betreibt das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching bei München den Tokamak ASDEX Upgrade, der seit den 1980er Jahren wichtige Erkenntnisse in der Fusionsforschung geliefert hat. Ferner betreibt Deutschland den Wendelstein 7-X Stellarator in Greifswald, der als eines der weltweit führenden Experimente im Bereich der Fusionsforschung gilt. Der Wendelstein 7-X hat zum Ziel, das Potenzial von Stellaratoren für eine zukünftige Fusionstechnologie zu untersuchen und die Herausforderungen in Bezug auf Stabilität und Leistung zu lösen. Beide Anlagen sind aufgrund ihrer limitierten Größe nicht geeignet, durch den Betrieb mit einem Gemisch aus Deuterium und Tritium einen Überschuss an Fusionsenergie zu erzeugen. Dieser Nachweis wird zum ersten Mal am ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) durch die Erzeugung eines sogenannten "brennenden Plasmas" angestrebt, bei dem die Fusion von DT ausreichend Energie erzeugt, um den Fusionsprozess aufrechterhalten zu können. Durch den Bau und Betrieb von ITER sollen wichtige technische, wissenschaftliche und technologische Herausforderungen der magnetischen Fusionsenergie erforscht und bewältigt werden, um den Weg für die Entwicklung zukünftiger kommerzieller Fusionskraftwerke zu ebnen.
- **Laser-Trägheitsfusion:** Die lasergetriebene Trägheitsfusion ist ein grundlegend verschiedener Ansatz zur Erzeugung von Energie aus Fusion, bei dem leistungsstarke Hochenergielaser genutzt werden, um einen kleinen Brennstoffkügelchen von ca. 2 mm Größe zu komprimieren und zu erhitzen. Bei Erreichen der Fusionsbedingung entsteht ein "brennendes Plasma", in dem die durch Fusion freigesetzte Energie zum Teil im Plasma verbleibt und dadurch weitere Reaktionen auslöst. Zurzeit gibt es nur eine Forschungseinrichtung auf der Welt, die ausreichend leistungsfähige Laser besitzt, um die Zündung zu erreichen: Die National Ignition Facility (NIF) am Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) in Kalifornien. Andere Länder wie Frankreich, Russland, und China errichten derzeit ähnliche Anlagen. Der Bau des NIF wurde 1997 begonnen und 12 Jahre später in Betrieb genommen. Die NIF ist nicht nur der leistungsstärkste Laser der Welt, sondern auch das größte jemals gebaute optische Instrument. Das 2009 begonnene Versuchsprogramm erreichte wichtige Meilensteine im Jahr 2014 (Lawson Criterion for fuel exceeded, Nature volume 506, pg343ff, 2014), im Jahr 2021 („Lawson Criterion for Ignition Exceeded“, Phys. Rev. Lett. 129, 075001) und am 5.12.2022 mit der Freisetzung von mehr Energie (3.15MJ) aus Fusionsreaktionen, als durch den Laser in das sogenannte Target eingebracht wurde (2.05MJ), das heißt auch unter Einbeziehung aller Verluste im Target, die aus der Konversion der Laserenergie in Druck und Heizung des Fusionsplasmas eingebracht wurde. Dieses Experiment wurde seitdem bereits viermal erfolgreich wiederholt, unter anderem am 30. Juli 2023 mit einer Fusionsenergie von 3.9MJ +/- 0.3MJ bei eingestrahlt 2.05MJ des Lasers. Nach der durch die National Academy of Sciences festgelegte Definition für die Leistungsbilanz für indirect-drive entspricht dies einem Gain von 1,9 und ist weltweit unübertroffen. NIF hat damit seit Beginn des Programms vor etwa 10 Jahren den Gain um 1000x für Fusionsplasmen gesteigert. Für ein funktionierendes Kraftwerk muss nun noch der Gain um einen weiteren Faktor von ca. 35x gesteigert werden.

Hintergründe zur erfolgreichen Zündung als wissenschaftlicher Durchbruch in der Laserträgheitsfusion

Das langfristige Ziel einer nationalen Initiative in Deutschland ist die Energieerzeugung. Die National Ignition Facility in USA wurde dabei nicht für die Erprobung eines Fusionskraftwerks

gebaut, sondern hauptsächlich für die Erforschung und Entwicklung der Zündung eines Fusionsplasmas im Kontext der Grundlagenforschung und der US-Verteidigungsforschung; mit anderen Worten, dieses geschah, um den wissenschaftlichen Beweis und das wissenschaftliche Verständnis für die Zündung eines Fusionsplasmas zu erbringen. Die Ergebnisse dieser Forschung sind transparent in den renommierten Zeitschriften wie Nature, Physics of Plasmas, Physical Review Letters und anderen veröffentlicht worden.

- Als Hintergrund: Die lasergestützte Trägheitsfusion wurde durch wegweisende Arbeiten von John Nuckolls und Nikolay Basov entwickelt. Mit der Demonstration des ersten Lasers 1960 wurde erkannt, dass sich durch Massenträgheit ein Plasma komprimieren, heizen und zünden lässt. Nach 50 Jahren intensiver Grundlagenforschung, dem Bau mehrerer Versuchsanlagen und Fortschritten in verschiedenen Bereichen wie Lasertechnik, Plasmaphysik, Materialwissenschaft und Hochleistungsrechnen wurde im Jahr 2021 erstmals die Zündung eines Plasmas durch Laserstrahlung an der National Ignition Facility demonstriert. Einige der dabei eingesetzten Technologien finden ihren Ursprung in Deutschland, darunter Schlüsseltechniken im Bereich der Targetherstellung und der Laser- und optischen Technik. In Deutschland wurde die Laser-Trägheitsfusion bisher nicht aktiv gefördert, was zu einer begrenzten Verfügbarkeit von Forschungsinfrastrukturen für diese Technologie führt. Informationen zu bestehenden Infrastrukturen sind im Memorandum der Expertenkommission "Trägheitsfusion" des BMBF zu finden. Bei der Entwicklung von Technologien für die Trägheitsfusion handelt es sich in Deutschland daher um sogenannte Spin-Ins, d.h. um Technologien, die für andere Bereiche entwickelt wurden und sich auch für die Trägheitsfusion eignen. Im internationalen Vergleich besteht in Deutschland noch Nachholbedarf in der Erforschung von hochenergetischen, dichten Plasmen (Fusionsplasmen), da diese Forschung bisher nicht gezielt gefördert wurde und die meisten Kernforschungszentren sowie Universitäten aufgrund des Ausstiegs aus der Kerntechnik andere Schwerpunkte gesetzt haben. Es gibt jedoch noch einige wenige Universitäten, die spezifische Ausbildung und Forschung in diesem Bereich anbieten. Allerdings ist Deutschland in wichtigen Schlüsseltechnologien, die für die Entwicklung der Trägheitsfusion in einem Kraftwerk erforderlich sind, sehr gut aufgestellt. Dies umfasst Bereiche wie Laser- und optische Technologien, Nanoengineering, Target-Technologie, Präzisions-Metrologie, DT-Treibstoffaufbereitung, Reaktormaterialphysik und -engineering, und viele weitere.

Gestaltung eines Förderprogramms

Die deutsche Regierung hat das enorme Potenzial der Fusionsforschung erkannt und plant, bis zum Jahr 2028 Fördermittel in Höhe von über einer Milliarde Euro bereitzustellen. Von diesem Betrag sollen 370 Millionen Euro für eine technologieoffene Förderung zur Verfügung stehen. Diese Herangehensweise dient der Risikominimierung, insbesondere vor dem Hintergrund, dass gegenwärtig nicht abgeschätzt werden kann, welcher der beiden Ansätze, Magnet- oder Trägheitsfusion, letztendlich erfolgreich sein wird und schneller zum Ziel führen kann, und wettbewerbsfähig sein wird. Um die Erfolgsaussichten für eine zukünftige nachhaltige, saubere und unbegrenzt verfügbare Energiequelle zu maximieren, ist es von großer Bedeutung, beide Ansätze in Deutschland weiterzuentwickeln. Es ist jedoch ratsam, das Förderprogramm als einen lernenden Prozess zu gestalten, bei dem Forschungsziele und Erfolgsaussichten kontinuierlich evaluiert werden. Finanziell unterstützte Forschungsansätze sollten auf Konzepten basieren, die durch experimentelle Nachweise und Experten-Peer-Reviews gestützt werden.

Synergetischer Überlapp zwischen Magnet- und Laserfusionsforschung:

Trotz der unterschiedlichen physikalischen Ansätze der Magnetfusion und der Trägheitsfusion sowie der starken Unterschiede in den technischen Grundkonzepten der Kraftwerke gibt es einige gemeinsame Anforderungen, die für beide Kraftwerkstypen von Bedeutung sind. Dazu gehören beispielsweise die Entwicklung eines regulatorischen Rahmens für Inbetriebnahme, Betrieb und Stilllegung, der Deuterium-Tritium Brennstoffkreislauf, die thermoelektrische Umwandlung und Turbinen, Kühlmechanismen, die Entwicklung von strahlungsfesten Materialien und Konstruktion von Reaktoren, sowie die Organisation von Abfallströmen und Sicherheitskonzepten. Daher ist es ratsam, das Forschungsprogramm auf technologieübergreifender Ebene zu koordinieren und Anreize für die Bildung gemeinsamer Arbeitsgruppen zu schaffen. Dies ermöglicht eine effiziente Nutzung von Ressourcen und verhindert redundante Entwicklungsarbeit.

Die Koordination der Entwicklungsarbeit an Reaktorkonzepten und Schlüsseltechnologien in fokussierten Technologiehubs ermöglicht den Austausch zwischen Wissenschaft und Industrie. Um Synergien effektiv zu nutzen, ist es wichtig, dass Technologiehubs themenbezogen und organisationsübergreifend agieren. Dies bedeutet, dass außeruniversitäre Forschungseinrichtungen, Industrie und Universitäten sich in Technologiehubs zusammenschließen und gemeinsam an der Entwicklung spezifischer Schlüsseltechnologien arbeiten. Durch diese Kooperation können Synergien schnellstmöglich genutzt werden. Insbesondere im Bereich der Kernfusion ist eine enge Verknüpfung von Grundlagenforschung, angewandter Forschung und industrieller Entwicklung erforderlich, um die Technologieentwicklung auf eine kommerzielle Anwendung auszurichten. Eine erfolgversprechende Möglichkeit zur Förderung von Innovationen besteht darin, Verbundprojekte in Form von Public-Private-Partnerships innerhalb eines klaren Kooperationsrahmens einzugehen. Durch diese Zusammenarbeit können auch Startups eine bedeutende Rolle bei der Entwicklung neuer Technologien und Lösungen in der Fusionsforschung einnehmen. Die Politik muss hierzu die Rahmenbedingungen schaffen.

Entwicklung von Fusionskraftwerken und deren Rahmenbedingungen

Die Entwicklung eines Fusionskraftwerks einschließlich aller erforderlichen Technologien stellt sowohl in der Trägheitsfusion als auch in der Magnetfusion eine große Herausforderung dar. Trotz des bereits erbrachten wissenschaftlichen Nachweises der Trägheitsfusion besteht weiterhin ein Bedarf an umfangreicher Grundlagenforschung. Diese Forschung ist von großer Bedeutung, um die Entwicklung von Targets mit noch höheren Gewinnraten voranzutreiben. Die erfolgreiche Zündung wurde bereits nachgewiesen, was nun den Weg für die gleichzeitige Entwicklung und Weiterentwicklung der Schlüsseltechnologien ebnet. Ein nahtloser Übergang von der Grundlagen- zur angewandten Forschung ist daher von entscheidender Bedeutung, um die Industrie in die Lage zu versetzen, von den Erkenntnissen zu profitieren und neue Innovationen voranzutreiben. Um schnellstmöglich voranzukommen, ist eine Zusammenarbeit auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene unerlässlich.

Um derartige Konzepte schnell und effizient verwirklichen zu können und Rechts- und Planungssicherheit zu schaffen, ist die Entwicklung eines technologieoffenen Rechtsrahmens und Einführung entsprechender Regulierungen unerlässlich. Damit sollten Sicherheitsbedenken berücksichtigt, Innovationen gefördert, Technologieausfuhrbestimmungen harmonisiert, wirksame Ausfuhrkontrollen durchgeführt und Lieferketten unterstützt werden. Die Schaffung eines prägnanten und übersichtlichen Rechtsrahmens für die Fusion wird dazu beitragen, Investoren anzuziehen, die sich langfristig engagieren wollen und das Potenzial der Fusion als Energiequelle nutzen möchten. Wichtig ist hier insbesondere die Schaffung eines angemessenen Regulierungsrahmens, der den spezifischen Anforderungen der neuen Technologien gerecht wird,

und der sich sachbezogen von den aktuell geltenden Rahmenbedingungen aus anderen Technologien, wie z.B. der Kernkraft, differenziert. Dieser sachgerechte Rahmen für die Entwicklung ist eindeutig zu begrüßen.

Um den wachsenden Anforderungen des privaten Sektors gerecht zu werden und gleichzeitig die Exzellenz der öffentlich finanzierten Forschung und Entwicklung aufrechtzuerhalten, ist es von entscheidender Bedeutung, in den Aufbau eines umfassenden und modernen Curriculums an Universitäten und Hochschulen zu investieren. Spezialisierung und praktische Ausbildung sind wichtige Komponenten und erfordern experimentelle Einrichtungen und modernste Entwicklungsfinanzierung. Universitäten und Hochschulen sollten mit Partnern aus der Industrie zusammenarbeiten, um Programme zu entwickeln, die praktische Ausbildungsmöglichkeiten in Versuchsanlagen bieten.

Der Aufbau von Nachwuchsgruppen ist hierbei besonders geeignet, um Studierende frühzeitig in die Kernfusions-Forschung einzubinden. Die Nachwuchsgruppen sind ein zusätzlicher Anreiz für Hochschulen Forschungskapazitäten und Knowhow aufzubauen. Modelle, in denen die akademischen Gruppen zusätzlich an außeruniversitäre Forschungseinrichtungen angebunden sind, bieten eine direkte Verbindung von Grundlagen- und angewandter Forschung mit bedarfsorientierter Ausrichtung. Die Einbindung der Nachwuchsgruppen in ein übergreifendes Netzwerk der Technologiehubs initiiert von Anfang an einen wissenschaftlichen Austausch.

Eine frühzeitige Einbindung und Aufklärung der breiten Öffentlichkeit spielt eine bedeutende Rolle in der Fusionsforschung. Durch eine gezielte Informationskampagne soll die Öffentlichkeit umfassend über die Vorteile und Möglichkeiten der Fusionsenergie informiert werden.

Die Fraunhofer Gesellschaft sieht sich hier im Einklang mit weiteren Forschungsorganisationen in der Schlüsselfunktion zwischen Grundlagenforschung und industrieller Umsetzung. Die Fraunhofer Gesellschaft fokussiert sich auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien und deren industrielle Verwertung. Damit spielt sie eine zentrale Rolle im Innovationsprozess Deutschlands, Europas und weltweit. Einige der Fraunhofer Institute nehmen in für die Fusionsforschung benötigten Technologiebereichen, insbesondere der Laser-Trägheitsfusionsforschung, eine weltweit führende Rolle in der Wissenschaft ein. So lieferte z.B. eine Fraunhofer Ausgründung des Fraunhofer Instituts für Angewandte Festkörperphysik IAF (Freiburg), Diamond Materials, die Brennstoffkugeln für den erfolgreichen Versuch des LLNL im Dezember 2022. Auf dem Gebiet der Lasertechnik und der Laserstrahlquellenentwicklung, die die Schlüsseltechnologie für die Laser-Trägheitsfusion darstellt, ist das Fraunhofer Institut für Lasertechnik ILT (Aachen) weltweit führend. Das Fraunhofer EZRT (Nürnberg) arbeitet mit der National Ignition Facility auf dem Gebiet der Charakterisierung von Targets. In weiteren Schlüsseltechnologien für die Fusionsforschung hat die Fraunhofer – Gesellschaft weitgefächertes Knowhow, wie z.B. der Materialentwicklung für den Einsatz unter Extrembedingungen, Fertigungs- und Produktionstechnologien, Aufskalierung von Prozessen, Einsatz von Simulationsverfahren unter Nutzung künstlicher Intelligenz und High Performance Computing (HPC). Die Fraunhofer Gesellschaft begrüßt und unterstützt außerordentlich einen offenen, wettbewerblichen und Meilenstein-bezogenen Ansatz in der weiteren Verfolgung der Technologien.

Zusammenfassung

In Deutschland muss ein Innovationsökosystem für die Fusionsforschung geschaffen werden, das sich auf vier Säulen stützt. Erstens ist ein starkes wissenschaftliches Programm erforderlich, um die nächste Generation von Forschern auszubilden und vorwettbewerbliche wissenschaftliche Fragen zu lösen. Insbesondere bei der Trägheitsfusion besteht hier erheblicher Nachholbedarf. Zweitens

müssen offene Forschungsinfrastrukturen geschaffen werden, die sowohl für die Wissenschaft als auch für die Industrie zugänglich sind, in einem geeigneten rechtlichen Rahmen operiert und für Deutschland weltweit attraktive Alleinstellungsmerkmale schafft. Drittens ist die Beteiligung einer kompetenten Industrie wichtig, um Innovationen voranzutreiben und den Technologietransfer zu erleichtern. Eine internationale Zusammenarbeit zwischen Regierungen als vierte Säule ermöglicht die effiziente Nutzung von Ressourcen und vermeidet Doppelarbeit. Durch gemeinsame Forschungs- und Entwicklungsprojekte können finanzielle Mittel, Fachwissen und Infrastrukturen effizient genutzt werden, was zu beschleunigten Fortschritten in der Fusionsforschung führt und Synergien schafft, um gemeinsame Herausforderungen anzugehen und die Entwicklung von Fusionsenergie voranzutreiben.

Ein solches Engagement in der Fusionsforschung kann sich in Zukunft erheblich auszahlen. Deutschland wird dadurch zu einem attraktiven Standort für talentierte Fachkräfte aus aller Welt, die ihr Wissen und ihre Fähigkeiten in diesem vielversprechenden Forschungsfeld einbringen können. Die Schaffung eines positiven Forschungsumfelds und die Förderung von öffentlich-privaten Partnerschaften tragen zur Stärkung der Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands bei.

Angesichts der Klimakrise, der steigenden Elektrifizierung von Industrie und Gesellschaft sowie dem wachsenden weltweiten Energiebedarf ist es von entscheidender Bedeutung, dass Deutschland und Europa in der Fusionsforschung führend sind. Eine strategische Ausrichtung auf Innovationsfähigkeit ermöglicht langfristige Wertschöpfung für Wirtschaft und Wissenschaft. Mit der Sicherung der Energieversorgung tragen wir nicht nur zur Souveränität und nationalen Sicherheit bei, sondern gestalten auch aktiv die Zukunft einer nachhaltigen und sauberen Energieversorgung.

Prof. Dr. Constantin Häfner
Beauftragter für Fusionsforschung
Fraunhofer Gesellschaft

Institutsleiter
Fraunhofer Institut für Lasertechnik ILT

Leiter BMBF Expertenkommission Trägheitsfusion

Prof. Dr. Rüdiger Quay
Mitglied der Task Force Fusionsforschung
Fraunhofer Gesellschaft

Institutsleiter
Fraunhofer Institut für angewandte
Festkörperphysik IAF
