



Anlagenkonvolut

zum Wortprotokoll der 53. Sitzung
am 27. September 2023

Ausschussdrucksachen:

- 20(18)139a Schriftliche Stellungnahme von Prof. Dr. Thomas Klinger
- 20(18)139b Schriftliche Stellungnahme von Herrn Prof. Dr. Hartmut Zohm
- 20(18)139c Schriftliche Stellungnahme von Herrn Rafael Laguna de la Vera
- 20(18)139d Schriftliche Stellungnahme von Herrn Prof. Dr. Markus Roth
- 20(18)139e Schriftliche Stellungnahme von Herrn Prof. Dr. Dipl. Ing. Tobias Schmidt
- 20(18)139f Schriftliche Stellungnahme von Herrn Prof. Dr. rer. nat. Constantin Häfner und Prof. Dr. Rüdiger Quay
- 20(18)139g Schriftliche Stellungnahme von Herrn Prof. Dr. Mario Ragwitz und Herrn Prof. Dr. Hans-Martin Henning
- 20(18)139h Schriftliche Stellungnahme von Herrn Dr. Francesco Sciortino

Stellungnahme zum Thema „Fusionsforschung“

Prof. Dr. Thomas Klinger

Direktor am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Greifswald

Fusion leichter Wasserstoffkerne ist die einzige von der Menschheit noch nicht genutzte Primärenergiequelle. Die dafür benötigen Ausgangsstoffe – Deuterium und Tritium – können aus dem Meerwasser und der Erdkruste leicht gewonnen werden. Für ein Großkraftwerk der Gigawatt-Klasse ist nur etwa 1 kg Brennstoff pro Tag erforderlich. Fusion ist frei von Treibhausgasemission, ist grundlastfähig und hat kein Potential für katastrophale Havarien. Alle diese Gründe sprechen dafür, die Fusion von Wasserstoff zu erforschen und deren Nutzung der Menschheit zugänglich zu machen.

Deutschland ist eines der führenden Länder der Fusionsforschung. Vor allem die Konzepte, die auf der Nutzung starker und speziell geformter magnetischer Felder basieren, wurden führend am Max-Planck-Institut aber auch am FZ Jülich und am KIT Karlsruhe gemeinsam erforscht. Spektakuläre Erfolge wurden mit der neusten Anlage erzielt, mit dem sogenannten Stellarator „Wendelstein 7-X“, der modernsten und größten Anlage ihrer Art weltweit. Die systematische Optimierung des Magnetfeldes ermöglicht neue Durchbrüche auf dem Gebiet der Fusionsforschung, so etwa der Leistungsbetrieb für lange Dauer. In der letzten Kampagne wurden das heiße, dünne Wasserstoffgas – das Plasma – bereits für 500 Sekunden äußerst stabil aufgebaut, was ein weltweites Echo geworfen hat.

Mit dem Stellarator hat Deutschland einen deutlichen Vorsprung weltweit. Die Ergebnisse des „Wendelstein 7-X“ haben eine regelrechte Euphorie in der Welt ausgelöst und mehrere private „start-up“-Unternehmen haben sich gegründet. Wir sind der Meinung, dass der Stellarator mit seinem durchdachten Magnetfeld größtes Potential für ein künftiges Fusionskraftwerk hat. Es ist jetzt an der Zeit, die Ergebnisse des „Wendelstein 7-X“ in ein konkretes Kraftwerkskonzept einzuspeisen.



MPI für Plasmaphysik · Boltzmannstraße 2 · 85748 Garching

Tokamak Scenario Development
Prof. Dr. Hartmut Zohm

Boltzmannstraße 2
D-85748 Garching bei München
Postanschrift:
Postfach 1322
D-85741 Garching bei München

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

Stellungnahme zum Antrag der CDU/CSU Fraktion

,Stärkung der Fusionsforschung auf Weltklasseniveau‘

Mit Schreiben vom 22.08. wurde ich zur öffentlichen Anhörung im Bundestag am 27.09.2023 eingeladen. Der Einladung folge ich gerne; in dieser Stellungnahme möchte ich einige Kommentare zum Antrag der CDU/CSU Fraktion abgeben.

Die Beschreibung der Ausgangslage und des potentiellen Nutzens der Kernfusion teile ich. Bezuglich des Fortschritts möchte ich anmerken, dass die Fusionsforschung mit magnetischem Einschluss von Beginn an die Energiegewinnung zur Versorgung der Menschheit zum Ziel hatte und daher auf einen über 50 Jahre andauernden Erkenntnisprozess zurückgreifen kann. Dies hat zur Folge, dass die Studien zu einem Fusionsreaktor auf diesem Gebiet sehr detailliert sind. Im Dezember 2021 erreichten europäische Forscher hier in der weltweit größten Anlage, JET in Großbritannien, einen signifikanten Meilenstein: Aus dem Brennstoff Deuterium-Tritium erzeugten sie 60 Megajoule Fusionsenergie. Deutschland hat seit den 1960er Jahren ein weltweit als herausragend anerkanntes Forschungsprogramm auf diesem Gebiet, das im Wesentlichen von KIT, FZ Jülich und dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik getragen wird.

Die weltweiten Forschungen zur Energiegewinnung aus Inertialfusion (der Fachbegriff für Laserfusion) sind dagegen bisher weniger intensiv auf ein Kraftwerk hin durchgeführt worden. Auf Grund dieses geringen Reifegrades gibt es momentan mehrere grundsätzlich unterschiedliche Ansätze, die in der Community z.T. kontrovers diskutiert werden. Es ist daher wichtig, schon vor Beginn der konkreten Förderung die einzelnen Ansätze kritisch bewerten zu lassen um die Förderung gezielt einsetzen zu können. Dies ist meiner Meinung nach bisher noch nicht in ausreichendem Maße geschehen.

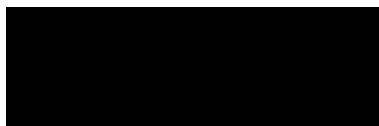
Wie im Antrag dargestellt, gibt es inzwischen in Deutschland vier Start-ups auf dem Gebiet der Fusionsenergie. Die rechtzeitige Einbindung der Industrie ist zum Bau eines Fusionsreaktors meines Erachtens unerlässlich. Die im Antrag formulierten Forderungen unterstütze ich daher zu Punkt 1 und



2 nachdrücklich. Zu Punkt 3 möchte ich zu bedenken geben, dass auf dem Gebiet der Fusionsforschung weiterhin, z.T. noch erheblicher, grundsätzlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht. Neben dem unter Punkt 3 angesprochenen Instrument des ‚pre-commercial procurement‘ sollte daher parallel auch die institutionelle Förderung der Fusionsforschung gestärkt werden.

Darüber hinaus besteht bei Umsetzung der vorgeschlagenen Strategie auch ein erheblicher Mehrbedarf an qualifiziertem Personal; dieses kann nur durch eine gleichzeitige Stärkung der Ausbildung in den einschlägigen Fächern mit Schwerpunkt Fusionsphysik und -technologie bereitgestellt werden.

Garching, 13.09.2023



Prof. Dr. Hartmut Zohm

Stellungnahme von **Rafael Laguna de la Vera**,
Direktor der Bundesagentur für Sprunginnovationen SPRIND

als Sachverständiger für die öffentliche Anhörung zum Thema "Fusionsforschung"
am 27. September 2023

Morgen ein funktionierendes Fusionskraftwerk zu haben, das umweltfreundlich und ressourcenschonend Strom zu wettbewerbsfähigen Kosten erzeugt, wäre umstritten eine Sprunginnovation. Ich denke, dass wir diese Technologie auch noch in 15-20 Jahren, so lange wird es realistischerweise mindestens dauern, bis Fusion endlich im Kraftwerk funktioniert, dringend benötigen werden, weil der Strombedarf der Menschheit – vor allem getrieben durch die Abkehr von Industrie und Mobilität von fossilen Energieträgern - weiter stark zunehmen wird. Unbegrenzt verfügbare, saubere, sichere und geopolitisch unabhängige Energie ist ein kritischer Beitrag zu Wohlstand, Gleichheit und damit auch für den Frieden weltweit.

Technologische Entwicklungen wie Supercomputer, KI, Laserdioden oder Hochtemperatursupraleiter führen aktuell die Fusionsforschung heraus aus der Grundlagenforschung. In den letzten drei bis vier Jahren konnte hierfür erstmals auch privates Kapital aktiviert werden: Weltweit haben 43 Fusions-Start-ups über sechs Milliarden Dollar an privaten Investitionen eingesammelt und arbeiten sehr zielgerichtet auf wettbewerbsfähige Fusionskraftwerke hin; darunter auch vier Unternehmen aus Deutschland.

Diese 43 Start-ups verfolgen eine sehr breite Palette technologischer Ansätze. Diese Vielfalt reduziert das Risiko – SPRIND setzt da eher auf das Rennen, nicht auf das Pferd. Gleichzeitig führen diese vielen parallelen Ansätze zu einem hohen Kapitalbedarf weltweit, der noch einmal stark steigen wird, sobald die Start-ups die ersten größeren Demonstrationsanlagen bauen.

Heute ist es schwer vorherzusagen, welche Methoden den Markt erreichen werden. Für die Politik gibt es aber auch jetzt schon Möglichkeiten, sinnvoll so einzugreifen, dass die gesamte Branche mit großer Hebelwirkung auch jenseits der Grundlagenforschung unterstützt wird.

Zunächst müssen wir verlässliche regulatorische Rahmenbedingungen schaffen. Zu strenge Vorschriften, die denen für **Kernspaltungskraftwerke** ähneln, würden die Kosten für Fusionskraftwerke in die Höhe treiben. Wir müssen jetzt Sicherheitsrichtlinien schaffen, die so gut wie möglich auf das geringere Risikoprofil von Fusionskraftwerken zugeschnitten sind. Nur so schaffen wir ein planbares, vertrauenswürdiges Umfeld für die Start-ups und deren Investoren. Die USA und UK sind uns hier schon voraus.

Technologisch finden sich Schnittmengen zwischen den verschiedenen Ansätzen oft früh in der Wertschöpfungskette. Die Unterstützung von Ausbildung, Plattform- und Querschnittstechnologien ist hier entscheidend. Zusätzlich können diese Technologien auch Innovationen in anderen Anwendungsbereichen und Branchen auslösen und sind nicht auf die Fusion beschränkt. Die SPRIND unterstützt deshalb z.B. die Entwicklung von

Lasertechnologie für die Fusionsenergiegewinnung mit insgesamt 90 Mio. Euro in fünf Jahren. Ein anderes solches Feld wären zum Beispiel Hochtemperatursupraleiter.

Strukturell müssen für die Kraftwerksentwicklungen größere Zentren/Cluster geschaffen werden - mit Anlagen bzw. Raum für Anlagen, die auch für die Start-ups zugänglich sind, und von einem aktiven Ökosystem umgeben sind. Das reduziert die Investitionskosten der Unternehmen, unterstützt den Transfer aus der Grundlagenforschung und unterstützt vor allem auch den Aufbau von Nachwuchs. Das Culham Center for Fusion Energy in UK ist hier beispielhaft. In Deutschland gibt es bereits Forschungsstandorte, die hervorragend als Keimzellen solcher Aktivitäten geeignet wären, wie z.B. Darmstadt mit der Gesellschaft für Schwerionenforschung, München mit dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und dem Center for Advanced Laser Applications oder Dresden mit dem Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf.

Klar ist aber auch, dass der Weg zu einem kommerziellen Fusionskraftwerk nur über internationale Kooperationen erfolgreich sein kann. Weder Europa noch die USA oder China beherrschen – unabhängig vom konkreten Ansatz - die gesamte Wertschöpfungskette. Experten sind weltweit rar und das nötige private Risikokapital wird nicht nur lokal beschafft werden können. Entscheidend ist, dass Europa im Rennen bleibt und seine technologische Souveränität in Schüsseltechnologien bewahrt, um ein Kooperationsspartner auf Augenhöhe zu bleiben.

Die Hoffnung auf Fusionsenergie darf die Weiterentwicklung und den Ausbau der Nutzung von erneuerbaren Energiequellen wie Wind, Solar und Geothermie nicht ausbremsen. Die Industrienationen können und müssen es sich aber leisten, mehrere Wege für eine nachhaltige Energieproduktion parallel voranzutreiben, um sicherzustellen, dass möglichst bald weltweit ausreichend regenerative Energie zur Verfügung steht.

Deutscher Bundestag
Ausschuss für Bildung, Forschung
und Technikfolgenabschätzung
Ausschussdrucksache
20(18)139d

20.09.2023



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Technische Universität Darmstadt | Schlossgartenstr. 9 | 64289 Darmstadt

Ausschuss für Bildung, Forschung und
Technikfolgenabschätzung

Deutscher Bundestag
Platz der Republik 1
11011 Berlin
bildungundforschung@bundestag.de

Institut für Kernphysik
Institute for Nuclear Physics



Prof. Dr. Markus Roth

Schlossgartenstraße 9
64289 Darmstadt

Datum
20.09.2023

Schriftliche Stellungnahme zur Anhörung Fusionsforschung am 27.09.2023

Erlauben Sie mir eine kurze Vorbemerkung: Die Kernfusion ist zweifellos eine der wichtigsten und vielversprechendsten Technologien, die wir heute in Betracht ziehen können. Ihre Potenziale sollten jedoch keinesfalls dazu führen, den dringend benötigten Ausbau erneuerbarer Energien zu bremsen oder deren Notwendigkeit in Frage zu stellen. Ich freue mich, dass dieser Aspekt in dem aktuellen Antrag so deutlich hervorgehoben wird.

Nun zur Kernfusion selbst: Sie repräsentiert die letzte verbleibende Energiequelle, die von der Menschheit noch nicht erschlossen wurde. Mit ihrer hohen Energiedichte, dem weltweit verfügbaren Brennstoff und der Abwesenheit von Sicherheitsrisiken sowie langlebigem radioaktivem Abfall, bietet die Kernfusion eine ideale, CO₂-freie Energiequelle für die Zukunft der Menschheit.

Nach Jahrzehnten intensiver Forschung haben wir in beiden grundlegenden Ansätzen der Fusionsforschung bedeutende Fortschritte erzielt. Diese Technologie hat sich von einer reinen Grundlagenforschung zu einem Stand entwickelt, an dem die Entwicklung von Prototypen für Fusionskraftwerke in Angriff genommen werden kann, mit dem Ziel, bis Ende der 2030er Jahre ein Demonstrationskraftwerk in Betrieb zu nehmen.

Die beiden grundlegend verschiedenen Ansätze - die Magnetfusion mit längerem Plasma-Einschluss und die Laserfusion mit Hochleistungslasern zur Kompression und Heizung des Fusionsbrennstoffs - haben in etwa den gleichen Entwicklungsstand erreicht. Die Magnetfusion hatte bisher einen leichten Vorsprung, der jedoch durch die jüngsten Erfolge in der Laserfusion aufgeholt wurde. Beachten Sie jedoch, dass viele der Herausforderungen, die bei der Magnetfusion auftreten durch den modularen Aufbau und die Trennung von Fusionstreiber und Reaktor, bei der Laserfusion nicht relevant sind, wie z. B. die thermische Isolation der ultrakalten Spulen von dem heißen Plasma (Hitzeschild), die Energieabfuhr an Divertoren oder die Kontrolle von Instabilitäten.

Somit kann zu diesem Zeitpunkt nicht festgestellt werden, welcher dieser Ansätze zuerst erfolgreich sein wird. Und selbst dann ist es für eine nachhaltige und weltweite Anwendung der Kernfusion wichtig, mehr als einen Weg erfolgreich zu beschreiten, allein schon, um die notwendigen Lieferketten beim Bau vieler Kraftwerke zu diversifizieren.



FOCUSED
ENERGY
Focused Energy GmbH
Im Tiefen See 34
64293 Darmstadt



International ist bereits erkennbar, dass das Rennen um die Fusions-Technologie begonnen hat. Während Europa bereits Testanlagen für die Magnetfusion wie JET und Wendelstein besitzt, fehlt eine vergleichbare Anlage im Bereich der Laserfusion. Wie im Expertenmemorandum der Bundesregierung dargelegt, ist eine Testanlage, selbst unterhalb der Energieschwelle zur Zündung der Fusionskapsel, von entscheidender Bedeutung für die Laserfusion.

Die Schlüsseltechnologien, insbesondere jene, bei denen Deutschland Wettbewerbsvorteile hat, müssen weiter ausgebaut werden, damit unsere Industrie eine bedeutende Rolle auf diesem Zukunftsmarkt spielen kann. Das allein ist jedoch nicht ausreichend, da nur in Zusammenarbeit mit den Wissenschaftlern, Technikern und Ingenieuren aus der Fusionsforschung und basierend auf einem wissenschaftlich fundierten Ansatz zielgerichtet die Technologien entwickelt werden können, die es braucht.

Die Fusionstechnologie, insbesondere die Laserfusion, kann nur durch die Zusammenarbeit der besten Köpfe weltweit erfolgreich sein. Frankreich und die USA sind hierbei besonders wichtige Partner im Bereich der Laserfusion. Eine sinnvolle Kooperation mit diesen Ländern ist entscheidend, um Ressourcen optimal zu nutzen, Doppelarbeit zu vermeiden und führende Experten beiderseits des Atlantiks zusammenzubringen. Die Forschung und der Aufbau von Fusionszentren sollten in enger Zusammenarbeit mit Start-up-Unternehmen und der Industrie erfolgen, um staatliche Mittel mit privaten Investitionen zu kombinieren. Das UK Fusion Valley bietet hierfür ein gutes Beispiel, in dem Großbritannien durch regulatorische Maßnahmen und Förderungen zahlreiche Unternehmen und Investoren angezogen hat und Synergien zwischen privaten und öffentlichen Initiativen nutzt.

Schließlich stellen die Entwicklungen, insbesondere im Bereich optischer Technologien, einen Mehrwert für die deutsche Wirtschaft dar. Viele dieser Technologien haben bereits jetzt ein hohes Potenzial zur Wertschöpfung.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit und Ihr Engagement für die Zukunft der Kernfusion.

Hochachtungsvoll



Prof. Dr. Markus Roth

Technologie-differenzierte Innovationspolitik

Prof. Dr. Dipl. Ing. Tobias Schmidt, ETH Zürich

Ziele erfolgreicher Innovations- und Industriepolitik

Erfolgreiche Innovations- und Industriepolitik fördert Technologien, die sich mittelfristig am Markt durchsetzen, und vermeidet solche, die sich nicht durchsetzen. Im Englischen ist die Rede von «picking winners, avoiding losers». Entscheidend für die Durchsetzungskraft am Markt sind die spezifischen Kosten der neuen Technologie (z.B. im Vergleich zu existierenden Alternativen). Wichtig sind dabei nicht nur die **Anfangskosten**, sondern vor allem die **Kostenreduktionspotentiale**, wie das Beispiel Photovoltaik eindrücklich gezeigt hat. Aus industrie-politischer Sicht ist ausserdem zentral, ob für **einheimische Industrien** ein mittel- bis langfristiger **Wettbewerbsvorteil** aufgebaut werden kann.

In der Vergangenheit weisst Deutschland hierbei eine gemischte Erfolgsbilanz auf. Weder die Bundesregierung noch der Bundestag scheinen ein Rahmenwerk zu nutzen, um potentielle Technologien hinsichtlich mittelfristiger Kosten und Chancen für die heimische Industrie evidenzbasiert zu bewerten und zu fördern.

Technologieeigenschaften und Kosten

In der Innovationsforschung wird die Frage beleuchtet, welche Eigenschaften Technologien benötigen, um mittelfristig tiefe Kosten zu erreichen und einheimische Industrien aufzubauen. Dabei werden drei entscheidende Technologieeigenschaften identifiziert:

- 1) Die **Design-Komplexität** einer Technologie (Anzahl und Vernetzung¹ von Komponenten)
- 2) Die **Fertigungs-Komplexität** einer Technologie (Anzahl und Vernetzung² von Prozessschritten bei der Herstellung)
- 3) Der **Anpassungsbedarf** einer Technologie, wenn sie in neuen Umgebungen eingesetzt wird (z.B. unterschiedliche klimatische oder regulatorische Gegebenheiten)

Untenstehende Tabelle erläutert die Effekte der drei Eigenschaften auf die oben genannten politischen Ziele Langfristkosten und Wettbewerbsvorteil für die heimische Industrie:

	mittelfristig tiefe Kosten	Industrieller Wettbewerbsvorteil
Design-Komplexität	<ul style="list-style-type: none">• hinderlich	<ul style="list-style-type: none">• förderlich
Fertigungs-Komplexität	<ul style="list-style-type: none">• förderlich (Massenfertigung)	<ul style="list-style-type: none">• förderlich nur für Hersteller von Produktionsanlagen
Anpassungsbedarf	<ul style="list-style-type: none">• hinderlich	<ul style="list-style-type: none">• hinderlich

¹ In der Literatur spricht man von «Design-Integralität». Dies bezeichnet, wie stark und wie gut definiert die *Komponenten* wechselwirken. Hohe Integralität bedeutet, dass eine Anpassung einer Komponente dazu führt, dass mehrere weitere Komponenten angepasst werden müssen, wobei unklar ist wie genau.

² In der Literatur spricht man von «Herstellungs-Integralität». Dies bezeichnet, wie stark und wie gut definiert die Prozessschritte wechselwirken. Hohe Integralität bedeutet, dass eine Anpassung eines Prozessschrittes dazu führt, dass mehrere weitere Prozessschritte (auf uneindeutige Weise) angepasst werden müssen.

Was heisst das für Fusionskraftwerke?

Kosten: Fusionskraftwerke weisen eine sehr hohe Design-Komplexität auf, was hohe Anfangskosten zur Folge hat. Ein Grossteil der Komponenten kann nicht in integrierter Massenfertigung gefertigt werden. Beide Aspekte sprechen für tiefe Lernraten also auch langfristig hohe Kosten. Etwas verbessert wird das Bild dadurch, dass der Anpassungsbedarf an neue Umgebungen als relativ tief einzuschätzen ist. Entsprechend gilt es festzuhalten, dass das Fehlen von Brennstoffkosten nicht automatisch dazu führt, dass Fusionsreaktoren mittelfristig tiefe Stromgestehungskosten erreichen.

Wettbewerbsvorteile: Die hohe Design-Komplexität (bei vermutlich mittlerer Fertigungs-Komplexität) von Fusionskraftwerken sowie ihr vermutlich überschaubarer Anpassungsbedarf an neue Umgebungen könnte zu einem Wettbewerbsvorteil für die Kraftwerkshersteller führen. Dies ist allerdings nur der Fall, wenn sich die Technologie langfristig kostenmässig durchsetzen kann (siehe oben).

Abschliessend ist aus meiner Sicht eine Fokussierung auf Fusionstechnologie innerhalb eines Technologieportfolios nicht zielführend. Warum sollte ihr ein grösseres Forschungsbudget zukommen als anderen emissionsfreien flexiblen Stromerzeugungs- und Speichertechnologien in (relativ) frühen Technologiereifestadien? Vielmehr sollten alle relevanten Technologiekandidaten mit einem Rahmenwerk wie in der Tabelle angedeutet, geprüft werden, um die vielversprechendsten Kandidaten zu identifizieren und gezielt zu fördern.

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 Brennstoffkugelchen von ca. 2 mm Größe zu komprimieren und zu erhitzten. 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 eingestrahlten 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 weiterzuverfolgen. 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 ebnnet. 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 Rechtsrahmen 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 Entwicklungsförderung. 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 bedarfsoorientierter 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

Prof. Dr. Hans-Martin Henning
Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE

Prof. Dr. Mario Ragwitz
Fraunhofer Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG

Deutscher Bundestag
Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung
Ausschussdrucksache
20(18)139g
22.09.2023

Freiburg und Cottbus, den 22.09.2023

**Stellungnahme zum Thema „Fusionsforschung“ und dem Antrag der Fraktion der CDU/CSU
„Stärkung der Fusionsforschung auf Weltklasseniveau“
(Drucksache 20/6907)**

Kernfusion und ihre mögliche Rolle bei der Transformation des globalen Energiesystems

Die disruptiven Entwicklungen auf den Energiemarkten in Folge des Kriegs Russlands gegen die Ukraine verdeutlichen die Notwendigkeit einer noch stärkeren Verknüpfung von Fragen der Versorgungssicherheit mit den Zielen für eine klimaneutrale Energieversorgung, deren drängende Notwendigkeit vor dem Hintergrund der globalen Erwärmung mit ihren weitreichenden Folgen immer deutlicher wird. Zugleich wurden in jüngerer Vergangenheit große Erfolgsschritte zur kontrollierten Kernfusion aus den USA gemeldet, die neue Hoffnungen auf eine baldige Verfügbarkeit dieser Technologie für eine klimaneutrale Stromerzeugung wecken. Vor diesem Hintergrund gilt es, eine solide Einschätzung darüber zu gewinnen, welche Rolle der Kernfusion bei dem globalen Umbau der Energieversorgung zu welchem Zeitpunkt zukommen kann.

Der wesentliche Erfolg der Experimente an der National Ignition Facility, einer Einrichtung zur Erforschung der Trägheitsfusion des Lawrence Livermore National Laboratory in Livermore, Kalifornien, war es, eine Fusionsreaktion von Deuterium und Tritium unter kontrollierten Bedingungen zu erreichen und damit den Beleg zu liefern, dass eine zivile Nutzung dieses physikalischen Phänomens für die Energiebereitstellung grundsätzlich machbar erscheint. Dies ist zwar prinzipiell gelungen, es bedarf aber noch einer Reihe grundlegender technologischer Entwicklungen sowohl bei Trägheitsfusion und der Magnetfusion, um einen ersten Demonstrator für ein Fusionskraftwerk zu ermöglichen. Hierzu zählen beispielsweise die Entwicklung von strahlungsfesten Materialien und der Ermöglichung des Umgangs mit Neutronenflüssen, die deutliche Erhöhung der Energieausbeute der Fusionsreaktion und die Fähigkeit, die Energie aus dem Reaktor abzuführen und unverbrannten Brennstoff zurückzugewinnen.

Der Weg bis zur technischen Nutzung des Fusionsprinzips für die Stromerzeugung in einem Kraftwerk ist also noch weit und birgt etliche Risiken. Für die Energiewende – in Deutschland, Europa und weltweit – gilt es deshalb, den aktuell eingeschlagenen Weg unverändert und beschleunigt fortzusetzen. Die Transformation des Energiesystems wird sich in den nächsten zwei Jahrzehnten dabei im Wesentlichen auf heute weitgehend bekannte Technologien stützen, die ihre grundsätzliche Funktionstüchtigkeit erwiesen haben. Dies sind insbesondere Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien und sämtliche Technologien, die für die Transformation des Energiesystems benötigt werden, um eine stabile Energieversorgung auf Basis erneuerbarer Energien zu

ermöglichen. Kernelemente einer solchen Transformation sind – neben der Hebung der Energieeffizienz und Strategien zur Reduktion des Energieverbrauchs – eine verstärkte direkte Stromnutzung in allen Endenergieanwendungen in Gebäuden, im Mobilitätssektor und der Industrie, die Herstellung von Wasserstoff und längerkettigen Molekülen (in Deutschland und Drittländern) auf der Basis von Wasserstoff für Anwendungen in der Energiewirtschaft, der Mobilität und der Industrie sowie die umfassende Nutzung der Geothermie insbesondere zur Deckung des Wärmebedarfs. Um den Umbau des Energiesystems unter Einbeziehung immer größerer Mengen volatiler erneuerbarer Energien, insbesondere Sonne und Wind, stabil und versorgungssicher zu gestalten, entwickelt sich die Flexibilisierung des Energiesystems zum neuen Paradigma, dessen Umsetzung auf allen System- und Netzebenen relevant ist. Dies beinhaltet eine zunehmende Sektorenkopplung, die Nutzung unterschiedlichster Speichertechniken (als Strom, Wärme sowie in Form stofflicher Energieträger), die Nutzung von Potenzialen zur Lastanpassung / Lastverschiebung bis hin zum Einsatz flexibler Stromerzeugung auf unterschiedlichen Netzebenen.

Vor dem Hintergrund dieses grundlegenden Systemumbaus stellt sich die Frage der systemischen Passfähigkeit einer neuen Technologie der Stromerzeugung, die möglicherweise in wenigen Jahrzehnten zur Verfügung steht und die starken Grundlastcharakter aufweist. Grundlastfähigkeit ergibt sich einerseits aus der technischen Ermöglichung einer zeitunabhängigen Stromerzeugung; andererseits ergibt sich Grundlastcharakter aus hohen Kapitalkosten bei zugleich – so zumindest die Hoffnung und Erwartung – niedrigen Betriebskosten. Eine solche Kostenstruktur legt einen Betrieb nahe, der möglichst zu einer Vollauslastung führt und damit eine kontinuierliche Stromerzeugung bei möglichst hoher Leistung bedingt, um eine hohe Wirtschaftlichkeit aus Betreibersicht zu garantieren.

Eine erfolgreiche Energiewende vorausgesetzt, werden in einem klimaneutralen, integrierten Stromsystem aller Voraussicht nach Wandler zur Nutzung erneuerbarer Energien, insbesondere Sonne und Wind, den Großteil der Stromerzeugung ausmachen und die Systemdynamik dominieren. Insofern werden vor allem schnell regelbare Kraftwerke zur komplementären Stromerzeugung benötigt werden, die im Jahresmittel durch eine vergleichsweise geringe Auslastung gekennzeichnet sein werden. Dies spricht aus betriebswirtschaftlicher Sicht für Stromerzeugungsanlagen mit möglichst geringen Kapitalkosten, während Betriebskosten wegen der geringen Anzahl an Vollaststunden nicht ganz so entscheidend sein werden. Dies spricht somit zugleich für eine eher geringe Passfähigkeit von Fusionskraftwerken in ein erfolgreich transformiertes, klimaneutrales Stromsystem.

Allerdings wird sich aller Voraussicht nach Strom global zur wichtigsten Primärenergie entwickeln. Denn aus klimaneutral hergestelltem Strom wird zukünftig ein Großteil der stofflichen Energieträger hergestellt werden, die in Sektoren benötigt werden, in denen eine direkte Elektrifizierung aufwändig oder nicht machbar ist – wie dem Luft- und Seeschiffsverkehr, Hochtemperaturprozessen in der Industrie oder auch der zuvor genannten komplementären Stromerzeugung. Daneben werden auch sämtliche heute fossil bereitgestellten Rohstoffe für Umwandlungsprozesse in der Industrie, wie z.B. in der Chemieindustrie oder der Stahlherstellung, durch auf Basis klimaneutralen Stroms synthetisch hergestellte Rohstoffe ersetzt werden. Elektrolytisch hergestelltem Wasserstoff wird dabei entweder als Endenergiträger oder Zwischenprodukt zur Herstellung langkettiger Moleküle – in Kombination mit Kohlenstoff oder auch Stickstoff – eine Schlüsselstellung zukommen. Für die Elektrolyse wird Wasser benötigt, das an vielen Orten des Globus aufgrund mangelnder Frischwasservorkommen durch Entsalzung von Meerwasser hergestellt werden wird. Somit ist mit gewaltigen zusätzlichen Strommengen zu rechnen, die für diese umfassende Transformation benötigt werden. Es ist gut vorstellbar, dass derartige integrierte Fabriken zur Herstellung synthetischer Energieträger und Rohstoffe – einschließlich der Gewinnung von Kohlenstoff und Wasser als Edukte für die verschiedenen Wandlungsschritte – autonom mit eigener Energieerzeugung betrieben werden und

somit nicht in flexibilisierte Energiemarkte integriert werden müssen. Dafür könnten Grundlastkraftwerke wie zukünftige Kernfusionskraftwerke sich sehr gut eignen, da eine hohe Auslastung nicht nur für die Stromerzeugung, sondern auch alle anderen Wandlungsschritte aus wirtschaftlicher Sicht wünschenswert ist. Ähnliche Anwendungen, die als eigenständige Produktionseinheiten im Dauerbetrieb gefahren werden können, sind Anlagen zur Meerwasserentsalzung für die Frischwasserproduktion, die vor dem Hintergrund des Klimawandels voraussichtlich in vielen Regionen der Welt in steigendem Maße benötigt werden, möglicherweise aber auch Anlagen zur Entfernung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre zur Deponierung im großen Maßstab. Diese zusätzlichen Nachfrager können über zentrale Stromnetze, welche wesentlicher Bestandteil eines auf erneuerbaren Energien basierenden Energiesystems sind, versorgt werden, in die auch Grundlastkraftwerke einspeisen.

Vor diesem Hintergrund sehen wir die Weiterentwicklung des Energiesystems auf Basis erneuerbarer Energien und die Kernfusion nicht als ein „Entweder... oder...“, sondern ein „Sowohl... als auch...“, aber immer unter der Berücksichtigung der unterschiedlichen zeitlichen Horizonte. Es wäre verheerend, wenn mit der Hoffnung auf eine schnelle technische Reife und Umsetzung der Kernfusion im energiewirtschaftlichen Maßstab die Bemühungen um den Umbau des Energiesystems im zuvor beschriebenen Sinne gebremst würden – im Gegenteil erfordert der fortschreitende Klimawandel eine Erhöhung der Anstrengungen und eine Beschleunigung des Aus- und Umbaus. Auf der anderen Seite gilt es bereits heute, Optionen für zusätzliche, neue Technologien in den Blick zu nehmen und deren Entwicklung im Rahmen dedizierter Forschungsprogramme voranzutreiben, um die auch nach Mitte dieses Jahrhunderts aller Voraussicht nach weiter steigenden Strombedarfe – insbesondere für die Herstellung nicht-fossiler stofflicher Energieträger und Rohstoffe – klimaneutral decken zu können.

Stellungnahme als Sachverständiger Öffentliche Anhörung zum Thema „Fusionsforschung“

– Dr. Francesco Sciortino, CEO Proxima Fusion –

Fusion ist die saubere, sichere und praktisch unbegrenzte Energiequelle von morgen. Damit Deutschland im weltweiten Rennen um die Fusion mithalten kann, braucht es jetzt innovationsfreundliche Regulierung, Ausbildung von Fachkräften und engagierte, staatliche Förderung. Nur so wird aus Spitzenforschung Made in Germany auch Spitzentechnologie Made in Germany.

Kernfusion: Saubere, sichere und praktisch unbegrenzte Energie

Die Kernfusion ist die ideale Energiequelle, um große Mengen an Wärme und Strom **kostengünstig, CO2-frei, kompakt, skalierbar, sicher und zuverlässig** zu erzeugen. Die Fusion ist nicht zu verwechseln mit der Kernspaltung, da sie **keine vergleichbaren Risiken** birgt. Als **grundlastfähige Energiequelle** ist Fusion eine **ideale Ergänzung zu den anderen Erneuerbaren Energien**. Jetzt ist es an der Zeit, die **Zukunft der deutschen und europäischen Energieversorgung** zu sichern.

Auf dem Weg zur Industrie des 21. Jahrhunderts

Auf dem Weg zum ersten Fusionskraftwerk ist die Entwicklung von **Plattformtechnologien** wie **Hochtemperatursupraleitern** und **völlig neuen, industriellen Fertigungsmethoden**, die die beachtlichen Fortschritte in Bereichen wie der additiven Fertigung, Machine Learning und generativem Computerdesign nutzen, essentiell. Damit legen wir gleichzeitig die **Grundlagen für die Industrie des 21. Jahrhunderts**. Deutschland bietet durch seine starke Forschungslandschaft, ein dynamisches Start-up-Ökosystem und eine leistungsfähige Industrie den idealen Standort. Mit der gezielten Entwicklung von Fusionstechnologien bietet sich uns die Möglichkeit, **einen völlig neuen Industriezweig** zu schaffen und ein **europaweit einzigartiges Technologie-Cluster** aufzubauen.

Von einer starken deutschen Fusionsindustrie würden auch andere Industriezweige durch **Spill-over-Effekte** profitieren. Beispielsweise werden durch die Entwicklung von supraleitenden Hochtemperaturmagneten bahnbrechende Fortschritte in **Medizin (MRT und Protonenbestrahlung)** und **Technik (hocheffiziente Elektromotoren, Windkraftanlagen sowie Hoch- und Mittelspannungsleitungen)** möglich.

Das Rennen ist eröffnet

Lange Zeit war die Fusionsforschung eine rein staatliche Aufgabe. Doch inzwischen ist ein **weltweites Rennen um die Fusionsenergie** entbrannt. In den USA, Großbritannien, Japan und China haben sich Start-ups zum Ziel gesetzt, die Erkenntnisse der öffentlichen Fusionsforschung umzusetzen und das erste wirtschaftlich nutzbare Kraftwerk zu bauen. Private Unternehmen stehen dabei nicht in Konkurrenz zur Grundlagenforschung, denn es geht darum, die **Stärken von Wissenschaft und Wirtschaft zu verbinden – in öffentlich-privaten Partnerschaften**. Das zeigt sich auch an weltweit insgesamt **6 Mrd. \$ privaten Investitionen** in die Fusionstechnologie.¹ **Doch Deutschland und Europa profitieren davon bisher nicht.** Auf technischer Ebene ist der **Stellerator das aussichtsreichste Konzept für das erste Fusionskraftwerk**: er bietet kontinuierliche Leistung, ist skalierbar und hocheffizient. Das bekräftigt auch die Fusion Roadmap des Konsortiums EUROfusion.²

¹ Fusion Industry Association (2023): The global fusion industry in 2023.

² EUROfusion (2018): European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy.

Deutschland – die Umsetzung nicht verpassen

Deutschland ist zwar in der Fusionsforschung führend, nicht aber bei der industriellen Umsetzung. Die USA,³ Großbritannien^{4,5} und Japan⁶ arbeiten an geeigneten Rechtsrahmen und setzen sich mit Nachdruck für Fusions-Start-ups ein. Damit droht Deutschland bei **einer der wichtigsten Technologien des 21. Jahrhunderts** den Anschluss zu verlieren. Und auch **China** mobilisiert inzwischen unglaubliche Ressourcen, arbeitet bereits an mehr Großprojekten als Europa und könnte uns **in zwei bis drei Jahren in Teilen der Forschung überholen.**^{7,8}

Die Fusion ist eine der **Schlüsseltechnologien für den Deep-Tech-Standort Deutschland**. Damit Start-ups in Deutschland den wissenschaftlichen Vorsprung jetzt für eine technologische Vorreiterrolle nutzen können, braucht es **innovationsfreundliche Regulierung, Ausbildung von Fachkräften und engagierte, staatliche Förderung**.^{7,8}

Schlusswort

Bei allen Maßnahmen ist vor allem der Zeithorizont entscheidend. International formiert sich die Fusionsindustrie vorrangig in den USA, Großbritannien und China – beschleunigt durch massive staatliche Investitionen. **Allein im Jahr 2024 stehen im US-Haushalt 1 Mrd. USD für die Fusion zur Verfügung⁹ – die Bundesregierung möchte 1 Mrd. EUR über die nächsten fünf Jahre bereitstellen.** Um die deutsche Wirtschaft im internationalen Wettbewerb zu stärken, ist eine klare politische Positionierung der Bundesregierung ebenso essenziell wie die Ausgestaltung ihrer Position zur Fusionsforschung¹⁰ mit konkreten Maßnahmen.

Proxima Fusion ist ein europäisches Start-up mit Sitz in München und das erste Spin-Out des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik (IPP). Durch unsere einzigartige öffentlich-private Partnerschaft mit dem IPP können wir jahrzehntelang aufgebaute Expertise, etablierte Industriepartner und ein lebendiges wissenschaftliches Umfeld im Wert von mehr als 1,3 Milliarden Euro nutzen. Unser Gründungsteam besteht aus Physikern und Ingenieuren von der Max-Planck-Gesellschaft, dem MIT und Google-X.

³ US Nuclear Regulatory Commission (2023): Regulatory Framework for Fusion Energy Systems.

⁴ Wissenschaftliche Dienste (2023): Sachstand – Zur Förderung der Kernfusionstechnologie in Großbritannien. WD 8-3000-003/23.

⁵ Department for Business, Energy & Industrial Strategy (2021): Towards Fusion Energy – The UK Government’s Fusion Strategy.

⁶ Council for Science, Technology and Innovation (2023): Fusion Energy Innovation Strategy.

⁷ Table Media (2022): Hope for unlimited power from nuclear fusion.

⁸ Fusion Industry Association (2021): Chinese Fusion Energy Programs Are A Growing Competitor in the Global Race to Fusion Power.

⁹ The White House (2023): FACT SHEET: President Biden’s 2024 Budget Invests in American Science, Technology, and Innovation to Achieve Our Nation’s Greatest Aspirations.

¹⁰ Bundesministerium für Bildung und Forschung (2023): Positionspapier Fusionsforschung