

Auf dem Weg zum ersten Fusionskraftwerk in Deutschland

Handlungsempfehlungen der deutschen Fusionsindustrie
für die politische und technologische Agenda

Pro-Fusion ist der Verband der deutschen Fusionsindustrie.

Er vereint Industriepartner, Start-ups, Zulieferer und Dienstleister entlang der gesamten Wertschöpfungskette – mit dem gemeinsamen Ziel, die industrielle Nutzung der Fusionsenergie Wirklichkeit werden zu lassen und damit den Grundstein für eine neue Energieära zu legen.

Als zentrale Stimme der Branche vertreten wir die gemeinsamen Interessen unserer Mitglieder gegenüber Politik, Öffentlichkeit und internationalen Akteuren.

Unser Ziel ist es, die Schlüsselrolle der Fusionsenergie für industrielle Wertschöpfung, Energiesouveränität und Klimaschutz sichtbar, verständlich und wirkungsvoll zu machen – in Deutschland, Europa und weltweit.

Executive Summary

Die Entwicklung der Kernfusion hat international eine neue Phase erreicht. Die Erfolge von W7-X (IPP Greifswald, Deutschland) und der physikalische Nachweis des Nettoenergiegewinns durch die National Ignition Facility, USA, sowie erhebliche staatliche Investitionsprogramme in den USA, China und weiteren Fusionsnationen markieren den Übergang von der Grundlagenforschung zur industriellen Umsetzung. Deutschland verfügt sowohl in der Magnetfusion als auch in der Laserfusion mit seiner starken Forschungs- und Industrielandschaft, sowie mehreren international wettbewerbsfähigen Fusionsunternehmen, über eine außergewöhnlich gute Ausgangsposition.

Die Bundesregierung hat im Koalitionsvertrag und im Aktionsplan Kernfusion das Ziel formuliert, das erste Fusionskraftwerk der Welt in Deutschland zu errichten. Dieses Ziel besitzt hohe strategische Relevanz für Energieversorgungssicherheit, Klimaschutz, industrielle Wertschöpfung, technologische Souveränität und internationale Wettbewerbsfähigkeit. Es erfordert nun eine klare politische Operationalisierung der politischen und technologischen Agenda auf dem Weg zum ersten Fusionskraftwerk in Deutschland.

1. PRÄZISIERUNG DES NATIONALEN FUSIONSZIELS

Zur Schaffung von Planungs-, Investitions- und Genehmigungssicherheit wird empfohlen, das nationale Fusionsziel eindeutig zu definieren. Aus Sicht von Pro-Fusion sollte das erste Fusionskraftwerk Nettoenergie erzeugen, d.h. Strom in das öffentliche Netz einspeisen, eine mittlere Verfügbarkeit von über 60 % erreichen und unter kommerziellen (wenn auch noch nicht gewinnorientierten) Rahmenbedingungen geplant, gebaut und betrieben werden. Alle erforderlichen Entwicklungs-, Demonstrations- und Qualifikationsschritte wären dann explizit Bestandteil dieses Zieles. Das erste Fusionskraftwerk stellt die Blaupause für nachfolgende wirtschaftliche Optimierungen und einen späteren industriellen Roll-out dar.

2. GOVERNANCE UND RESSORTÜBERGREIFENDE STEUERUNG

Das nationale Fusionsziel sollte als Moonshot, d.h. als programmorientierter Gesamtansatz umgesetzt werden. Da die Entwicklung der Fusionsenergie zentrale Zuständigkeiten mehrerer Ressorts berührt (Wirtschaft, Energie, Finanzen, Forschung, Umwelt, internationale Kooperation), wird zur Sicherstellung von Kohärenz, Geschwindigkeit und Verlässlichkeit die Etablierung einer zentralen Koordinierungsfunktion auf Staatssekretärebene empfohlen.

3. TECHNOLOGIEOFFENE FÖRDERUNG BEIM INDUSTRIELLEN SCALE-UP

Zur Risikominimierung und Beschleunigung wird empfohlen, alle erfolgversprechenden technologischen Ansätze technologieoffen und parallel zu unterstützen. Gleichzeitig ist der systematische Aufbau industrieller Liefer- und Wertschöpfungsketten entscheidend, insbesondere für die Tritium-Erbrütung und den Brennstoffkreislauf, Fusionsmaterialien, supraleitenden Hochtemperaturmagneten, und für Lasertechnologien, Leistungselektronik und Spezialkomponenten. Hierzu ist ein langfristiges, verlässliches Bekenntnis der Politik Voraussetzung, damit etablierte Industrieunternehmen investieren, Produktionskapazitäten aufbauen und positive Cash-Flows erzielen können.

4. ZENTRALE TECHNOLOGIEBEZOGENE POLITISCHE HANDLUNGSFELDER

Aus industrieller Sicht sind politisch und technologisch insbesondere folgende operative Maßnahmen prioritär:

- **Regulatorik und Normung:** Aufnahme von Fusionsanlagen in das Strahlenschutzrecht, Harmonisierung nationaler und europäischer Vorschriften sowie temporäre Finanzierung der industriellen Mitwirkung in Normungsgremien.
- **Material- und Komponentenqualifikation:** Ermöglichung schrittweiser Qualifikation direkt im First-of-a-Kind-Reaktor (FOAK), flankiert durch regulatorische Absicherung.
- **Magnettechnologien:** Staatlich unterstütztes Up-scaling der HTS-Leiterproduktion, Aufbau eines Industrieparks für Fusionsmagnete sowie einer zentralen Spulentestanlage.
- **Lasertechnologien:** Staatlich unterstützter Aufbau von Produktionskapazitäten für Pumpdioden, Glasmaterialien, Kristalle und Optiken.
- **Tritium-Infrastruktur:** Aufbau einer industriell geführten Infrastruktur zur Entwicklung, Erprobung und Genehmigung des Tritium-Brennstoffkreislaufs in Deutschland.
- **Abfall- und Entsorgungskonzepte:** Frühzeitige, transparente Klärung auf Basis bestehender kerntechnischer Kompetenzen zur Sicherung gesellschaftlicher Akzeptanz.
- **Finanzierung:** Kombination aus meilenstein- und leistungsbasierten Instrumenten, darunter Zuschüsse, Kreditprogramme und Beteiligungskapital; gezielte Nutzung und Erweiterung bestehender deutscher und EU-Programme und Instrumente (z.B. Wachstumsfonds Deutschland, IPCEI¹ (Important Project of Common European Interest) für innovative Nukleartechnologien), sowie Prüfung regulatorischer Anpassungen für institutionelle Investoren.
- **Künstliche Intelligenz:** Öffnung bestehender KI-Förderprogramme für Anwendungen in der industriellen Fusionsentwicklung als strategischer Beschleuniger.

FAZIT UND MINISTERIELLE RELEVANZ

Der Bau des ersten Fusionskraftwerks in Deutschland ist kein reines Forschungsprojekt, sondern ein strategisches Industrie-, Energie- und Infrastrukturvorhaben von nationaler Bedeutung. Sein Erfolg hängt maßgeblich von klaren politischen Zieldefinitionen, einer wirksamen ressortübergreifenden Steuerung sowie verlässlichen regulatorischen und finanziellen Rahmenbedingungen ab.

Ein entschlossenes, koordiniertes ministerielles Handeln eröffnet die Chance, Deutschland dauerhaft als Leitmarkt und Leitanbieter für Fusionsenergie zu etablieren, industrielle Wertschöpfung im Land zu sichern und einen entscheidenden Beitrag zur klimaneutralen Grundlastversorgung der Zukunft zu leisten.

HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Das vorliegende Dokument präsentiert Vorschläge und Handlungsempfehlungen der deutschen Fusionsindustrie für die politische und technologische Agenda zur Erreichung des nationalen Fusionsziels. Diese sind nachfolgend zusammengefasst.

¹ IPCEI (für innovative Nukleartechnologien) ist ein Instrument, welches in besonderer Weise geeignet ist, mit signifikanter staatlicher Beteiligung privates Kapital zu mobilisieren und industrielle Skalierung zu ermöglichen. Ein Beitritt Deutschlands zum IPCEI würde zudem eine frühzeitige Befassung mit EU-kompatiblen Beihilfeverordnungen bewirken und damit indirekt mehr Rechtssicherheit für die Finanzierung und Absicherung innovativer Nukleartechnologien schaffen.

HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

<i>Vorschlag 1: Konkretisierung des nationalen Fusionsziels</i>	8
<i>Vorschlag 2: Etablierung eines/r Koordinators/in für Fusionsenergieerzeugung</i>	9
<i>Vorschlag 3: Erreichung des nationalen Fusionsziels durch Etablierung eines langfristig angelegten Moonshot-Programms</i>	9
<i>Vorschlag 4: Förderung technologieoffen, aber wettbewerblich und im Hinblick auf das nationale Fusionsziel gestalten</i>	12
<i>Vorschlag 5: Bestätigung der langfristigen politischen Verpflichtung zum Aufbau von Fusionskraftwerken</i>	13
<i>Vorschlag 6: Stärkung der deutschen und europäischen Supply Chain durch internationale Kooperationen</i>	13
<i>Vorschlag 7: Kooperationen mit Forschungseinrichtungen entlang klarer Industrialisierungsziele</i>	13
<i>Vorschlag 8: Aufsetzen eines anpassbaren Finanzierungsinstrumentariums für Fusion</i>	14
<i>Vorschlag 9: Beitritt IPCEI für Fusionstechnologien</i>	14
<i>Vorschlag 10: Zuwendungen in Abhängigkeit des Erreichungsgrades von abgestimmten Meilensteinen</i>	14
<i>Vorschlag 11: Auflage/Erweiterung des Wachstumsfonds Deutschland für Fusionsinvestitionen</i>	16
<i>Vorschlag 12: Anpassung Investitionsvorschriften für Versicherungen u.ä. Kapitalverwalter</i>	16
<i>Vorschlag 13: Aufnahme von Fusionsanlagen in das Strahlenschutzgesetz</i>	16
<i>Vorschlag 14: Entwicklung einer adäquaten und abgestuften Regulatorik</i>	17
<i>Vorschlag 15: Harmonisierung der Fusions-Regulatorik</i>	17
<i>Vorschlag 16: Rechtssicherheit durch Verbindlichkeit von Vorschriften zum Genehmigungszeitraum</i>	17
<i>Vorschlag 17: Anstreben der Führung des ISO Sub-Committees für Fusionstechnologie</i>	18
<i>Vorschlag 18: Aktive Förderung der internationalen Fusions-Standardisierung</i>	18
<i>Vorschlag 19: Aktive Nutzung von Fördermitteln zur Entwicklung der KI auch für Anwendungen in der industriellen Fusionsentwicklung</i>	19

Vorschlag 20: Strategische Nutzung von Supercomputer Kapazitäten	19
Vorschlag 21: Förderung der Entwicklung von Digitalen Zwillingen für fusionsrelevante Systeme	20
Vorschlag 22: Frühzeitige Förderung der Entwicklung geeigneter Strukturen für das Projektmanagement, das Systems Engineering und das Konfigurationsmanagement	20
Vorschlag 23: Intensivierung der internationalen Kooperation für die Entwicklung und Qualifizierung fusionsrelevanter Materialien	21
Vorschlag 24: Priorisierung der Forschung in bestehenden Neutronenquellen im Hinblick auf fusionsrelevante Materialien	21
Vorschlag 25: Zulassung von Material Qualifikationen im First-of-a-Kind Reaktor	21
Vorschlag 26: Förderung einer großtechnischen HTS Leiterproduktion in Deutschland	22
Vorschlag 27: Aufbau eines Industrieparks zur Fusionsmagnetherstellung	23
Vorschlag 28: Aufbau einer Spulentestanlage für Fusionsmagnete	23
Vorschlag 29: Aufbau einer Produktionskapazität für Laserdioden in Deutschland	25
Vorschlag 30: Förderung der großtechnischen Produktion von Laserglas	25
Vorschlag 31: Entwicklung von Kristallen zur Frequenzkonversion mit großer Apertur	25
Vorschlag 32: Förderung der Entwicklung von Hochleistungsoptiken	25
Vorschlag 33: Förderung der Entwicklung von Hochleistungs-Kompressionsgittern	25
Vorschlag 34: Förderung der Entwicklung von Synchronisation und Pointing Stability der Laserkanäle	25
Vorschlag 35: Förderung der Entwicklung von finalen Optiken	25
Vorschlag 36: Förderung von Alternativen zu DT-Eis	25
Vorschlag 37: Aufbau einer Infrastruktur zur Entwicklung und Testung des Tritium-Brennstoffkreislaufes	26
Vorschlag 38: Transparente Klärung des Umgangs mit Abfällen	27
Vorschlag 39: Technologieentwicklungen für die Magnet- und Laserfusion	28

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	7
Politische Agenda	8
Konkretisierung des nationalen Fusionsziels	8
Governance	8
Roadmaps der Fusionsenergieunternehmen (Start-ups)	10
Stärken der deutschen Supply Chain weiterentwickeln	12
Kooperationen mit Forschungseinrichtungen unter industrieller Führung	13
Finanzierungsrahmenbedingungen	13
Regulatorik und Normung	16
Digitale Anwendungen bei der Industrialisierung der Kernfusion	19
Projektmanagement, Systems Engineering, Konfigurationsmanagement	20
Technologische Agenda	20
Materialentwicklung	20
Magnettechnologien	21
Lasertechnologien	23
Tritium Brütung und Brennstoffkreislauf	26
Abfallmanagement	27
Technologie Deep Dives	27

Einleitung

Der wachsende Energiebedarf moderner Gesellschaften stellt Industrie, Politik und Forschung vor eine zentrale Herausforderung: Wie lässt sich grundlastfähige Energieerzeugung in ausreichender Menge, klimaneutral, zuverlässig, sauber, souverän und zugleich bezahlbar für eine hochindustrialisierte und zunehmend elektrifizierte Welt sicherstellen? Die Kernfusion bietet hierfür eine vielversprechende Perspektive. Sie vereint das Potenzial nahezu unbegrenzter Energieproduktion mit hoher Umweltverträglichkeit und kann damit zur tragenden Säule einer florierenden, energieintensiven Industrie werden.

Über die wirtschaftliche Dimension hinaus besitzt Kernfusion eine strategische Bedeutung für die Energiesouveränität. In einem Umfeld zunehmender geopolitischer Spannungen, volatiler Märkte und möglicher Lieferkettenunterbrechungen wird eine resiliente Energieversorgung zum sicherheitspolitischen Faktor gerade für Deutschland als exportorientierte Nation mit sehr geringen natürlichen Energieressourcen. Fusionskraftwerke benötigen nur geringe Mengen an Brennstoff, der langfristig lagerfähig und verfügbar ist. Abhängigkeiten von fossilen Importen oder politisch instabilen Regionen lassen sich dadurch erheblich reduzieren.

Eine auf Fusion basierende Energieinfrastruktur ermöglicht Staaten und Wirtschaftsregionen, ihre Energieversorgung selbstbestimmt zu gestalten, kritische Industrien aufrechtzuerhalten und gesellschaftliche Funktionen auch unter Druck zuverlässig zu sichern. Sie ist planbar, wetterunabhängig und grundlastfähig. Energiesouveränität wird so nicht nur ökonomisch, sondern auch sicherheitspolitisch gestärkt.

Kernfusion steht damit für mehr als nur eine neue Energiequelle. Sie ist ein strategisches Zukunftsinstrument: für saubere, bezahlbare und leistungsfähige Energie in einer elektrifizierten Industriegesellschaft und für eine resiliente, souveräne Versorgung in einer komplexen, geopolitisch herausfordernden Welt.

Im weltweiten Wettlauf um das erste kommerzielle Fusionskraftwerk und damit um die Führungsrolle einer exportfähigen Industrie besitzt Deutschland durch jahrzehntelange herausragende Leistungen in der Stellarator-Technologie, Durchbrüche bei der Laserfusion und die hier ansässigen Deep Tech Start-

ups gute Chancen auf Erfolg. Fusionsenergie weist keine kritischen Abhängigkeiten von Materialien und Komponenten in andere Wirtschaftsräume auf und kann dadurch die europäische Souveränität in geopolitischen Fragen stärken. Zwischen dem chinesischen Modell des Staatskapitalismus und dem amerikanischen Venture Capital -getriebenen Weg in der Fusionstechnologie, kann Europa nur durch eine Verbindung von privaten und öffentlichen Akteuren zum Erfolg kommen. Neben einer klaren Führungsrolle der Industrie braucht es daher auch ein starkes Bekenntnis des Staates zur Fusionsenergie. Am Ende dieser Entwicklung muss eine leistungsfähige europäische Industrie stehen, die wettbewerbsfähige Energiepreise sichert, die industrielle Basis Europas stärkt und zugleich kritische Abhängigkeiten reduziert – mit einer Energieversorgung, die auch in geopolitischen Konfliktlagen verlässlich und resilient bleibt.

In den vergangenen Jahren hat die Entwicklung der Fusionsenergie weltweit einen entscheidenden Wendepunkt erreicht. Zentrale wissenschaftliche Durchbrüche haben gezeigt, dass die Erzeugung von Nettoenergie aus Fusionsprozessen physikalisch möglich ist. Staaten wie die USA und China investieren seither mit wachsender Intensität und in bislang nicht gekannter Größenordnung in Fusions-Programme und industrielle Skalierung. Parallel dazu konnte in Deutschland mit Wendelstein 7-X erstmals ein supraleitender Stellarator mit modularen Spulen erfolgreich in Betrieb genommen werden, der neue Maßstäbe für den Dauerbetrieb von Fusionsanlagen setzt. Pro-Fusion ist überzeugt, dass die kommerzielle Stromerzeugung mittels Kernfusion erreichbar ist und dass Deutschland nun vor der entscheidenden Phase steht: dem Übergang von rein wissenschaftlichen Experimentieranlagen zu industriell nutzbaren Kraftwerken. Die Bundesregierung hat diese historische Dimension erkannt und im Koalitionsvertrag sowie im Aktionsplan Kernfusion ein nationales Fusionsziel festgeschrieben: „Die Bundesregierung verfolgt das Ziel, das erste Fusionskraftwerk der Welt in Deutschland zu errichten.“²

Der Weg zum ersten Fusionskraftwerk erfordert ambitionierte, mutige und auch disruptive Ansätze, sowohl technologisch als auch finanziell, um die Knappheit von CO₂ neutraler, grundlastgeeigneter Stromproduktion in Deutschland langfristig zu beheben, Fusionstechnologien und -wissen in Deutschland aufzubauen und somit mit der entstehenden Wertschöpfungskette langfristig massive positive Effekte für die deutsche Wirtschaftskraft zu generieren.

² "Deutschland auf dem Weg zum Fusionskraftwerk - Aktionsplan der Bundesregierung", S. 1, BMFT, Oktober 2025

Um dieses Ziel zu erreichen, braucht es eine nationale Kraftanstrengung, die über klassische Forschungsförderung hinausgeht. Neben der Bewältigung verbleibender technologischer Herausforderungen sind insbesondere:

- ein verlässlicher Rechtsrahmen,
- innovative Finanzierungsinstrumente unter Einbeziehung privaten Kapitals,
- der systematische Aufbau und die Skalierung der industriellen Supply Chain,
- sowie die enge Verzahnung mit internationalen Fusionsprojekten

erforderlich.

Das vorliegende Dokument präsentiert Vorschläge und Handlungsempfehlungen der deutschen Fusionsindustrie für die politische und technologische Agenda zur Erreichung des nationalen Fusionsziels.

Politische Agenda

Konkretisierung des nationalen Fusionsziels

Pro-Fusion schlägt vor, das erste Fusionskraftwerk so zu definieren, dass – bei einer mittleren Verfügbarkeit von mehr als 60 % – mehr Energie an das Stromnetz abgegeben werden kann, als zum Betrieb dem Stromnetz entnommen wird. Gleichzeitig sollte es nach kommerziellen Gesichtspunkten und für einen kommerziellen – wenn auch noch nicht wirtschaftlichen – Betrieb geplant und gebaut werden. Alle dazu notwendigen Zwischenschritte sind explizit Teil dieses Ziels. Dieses von Pro-Fusion vorgeschlagene Zielkraftwerk kann dann als Blaupause und Basis für weitere wirtschaftliche Optimierungen dienen.

Vorschlag 1: **Konkretisierung des nationalen Fusionsziels**

Die Bundesregierung verfolgt das Ziel, das erste Fusionskraftwerk der Welt in Deutschland zu errichten, welches

- *Nettoenergie erzeugt und an das Stromnetz abgeben kann,*
- *planmäßig eine mittlere Verfügbarkeit von mehr als 60 % hat,*

- *unter kommerziellen (wenn auch noch nicht gewinn-orientierten) Gesichtspunkten geplant, gebaut und betrieben wird.*

Alle dazu notwendigen Zwischenschritte sind explizit Teil dieses Ziels.

Governance

ZENTRALE POLITISCHE FÜHRUNG UND STEUERUNG

Die Entwicklung der Fusionsenergie in Deutschland ist ein strategisches Großvorhaben von nationaler Bedeutung. Sie betrifft zahlreiche Ressorts, insbesondere Wirtschaft, Energie, Finanzen, Forschung und Umwelt, und erfordert zugleich eine enge Abstimmung mit europäischen Partnern sowie führenden Fusionsnationen außerhalb Europas. Dieses Vorhaben ist zu wichtig, um es dem Risiko divergierender Einzelinteressen, unkoordinierter Zuständigkeiten oder sektoraler Prioritätensetzungen auszusetzen.

Um Kohärenz, Geschwindigkeit und Verlässlichkeit zu sichern, regt Pro-Fusion eine klar verankerte, ressortübergreifende politische Führung und Koordination an. Diese sollte in der Lage sein, strategische Prioritäten zu bündeln, Zielkonflikte frühzeitig zu adressieren, Entscheidungen zu beschleunigen und die Umsetzung des nationalen Fusionsziels über Legislaturperioden hinweg konsistent zu steuern.

Für die notwendige Durchsetzungskraft und Verbindlichkeit sollte ein/e Koordinator/in auf hoher politischer Ebene angesiedelt sein, etwa auf Ebene eines/r Staatssekretärs/in. Er/sie agiert von dieser Ebene aus, um die fusionsspezifischen – und darunter insbesondere die industriepolitischen – Belange zwischen den Ministerien neutral zu koordinieren und die internationale Zusammenarbeit im Bereich der Fusion zu intensivieren. Es geht dabei ausdrücklich nicht um den Aufbau neuer Bürokratie, sondern um klare politische Führung, verbindliche Koordination und die effiziente Verzahnung bestehender Zuständigkeiten im Sinne eines strategischen Zukunftsprojekts für Deutschland.

Vorschlag 2:
**Etablierung eines/r Koordinators/in für
Fusionsenergieerzeugung**

Pro-Fusion regt die Etablierung eines/r Fusions-Koordinators/in mit entsprechenden Befugnissen an, um die ressortübergreifende Abstimmung zwischen den beteiligten Ministerien zu stärken und die Priorität auf die Erreichung des nationalen Fusionsziels zu setzen. Die Koordinationsfunktion sollte aus Sicht von Pro-Fusion mindestens auf der Ebene eines Staatssekretärs angesiedelt sein.³

**PROGRAMM-ORIENTIERTE UMSETZUNG
DES FUSIONSZIELS**

Darüber hinaus schlägt Pro-Fusion vor, die Umsetzung des nationalen Fusionsziels politisch als echten Moonshot zu positionieren – als koordiniertes, langfristiges, strategisches Vorhaben mit systemischer Bedeutung für Energieversorgung, Industrie, Sicherheit und technologische Souveränität. Ein Moonshot ist kein Einzelprojekt und keine klassische Forschungsförderung, weshalb es als programmorientierter Gesamtansatz zu organisieren ist. Ein solches Programm bündelt sämtliche Aktivitäten, die für den Übergang von der Forschung zur industriellen Nutzung der Fusion erforderlich sind, und ermöglicht eine koordinierte Steuerung über mehrere Ressorts und Akteure in Industrie und Forschung hinweg.

Vorschlag 3:
**Erreichung des nationalen Fusionsziels durch
Etablierung eines langfristig angelegten
Moonshot-Programms**

Die Umsetzung des nationalen Fusionsziels erfordert einen programmorientierten Gesamtansatz, der Industrie, Forschung, Infrastruktur und Politik in einem gemeinsamen Rahmen zusammenführt. Nur durch ein koordiniertes, ambitioniertes und langfristig angelegtes Programm kann die Fusionsenergie im Sinne des nationalen Fusionsziels erfolgreich zur Anwendung gebracht werden.

Historisch (und durch Studien belegt) zeigen vergleichbare nationale Moonshot-Programme – z.B. das Apollo-Programm der USA –, wie ambitionierte Innovationsziele erfolgreich erreicht werden können, nämlich dann, wenn sie als integrierte Programme mit klarer Zielorientierung, langfristiger Finanzierung, Risikoteilung zwischen Staat und Privatwirtschaft, transparenter Struktur und verlässlicher Governance geführt werden. In weniger als zehn Jahren hat das Apollo-Programm eine technologische Revolution ausgelöst – mit massiven industriellen Spillover-Effekten weit über die Raumfahrt hinaus. Auch der US-amerikanische CHIPS and Science Act – ein Programm zum Wiederaufbau der Halbleiter-Wertschöpfungskette – zeigt exemplarisch, wie der Aufbau eines strategischen Industriezweigs durch einen staatlich orchestrierten Moonshot gelingen kann – von Forschung über Produktion bis hin zu Zulieferern und Qualifizierung. Durch diese programmatische Logik konnte der Staat First-of-a-kind-Risiken abfedern, private Investitionen mobilisieren und Wettbewerb zwischen Unternehmen erhalten. Für die Fusionsenergie lässt sich daraus unmittelbar lernen: Wenn der Staat im Rahmen eines programmorientierten Gesamtansatzes Ziel und Rahmen vorgibt, Risiken in der frühen Industrialisierungsphase teilt und Planungssicherheit schafft, entstehen Märkte, Lieferketten und private Investitionen – lange bevor die Technologie vollständig kommerzialisiert ist.

Das Programm darf dabei bei weitem nicht nur Aktivitäten in der Forschung umfassen, sondern muss auch Aktivitäten in weiteren wichtigen Bereichen einschließen: industrielle Skalierung und Lieferkettenaufbau, Infrastrukturmaßnahmen, regulatorische und rechtliche Rahmenbedingungen, Systemintegration und Kraftwerksvorbereitung, Digitalisierung und KI-gestützte Entwicklungsprozesse, internationale Kooperationen, sowie querschnittliche Themen, die sowohl für Magnet- als auch für Laserfusion relevant sind. Die erwarteten Innovationen würden weit über den Fusionsbereich hinaus wirken und substantielle Impulse für die deutsche Industrie, Produktivität und technologische Souveränität setzen.

³ Aus dem zum Aufbau der Kernenergie berufenen Atomminister und seinem Ministerium hat sich in den Folgejahren das BMFTR in seiner heutigen Form entwickelt.

Roadmaps der Fusionsenergie- unternehmen (Start-ups)

Aktuell gibt es in Deutschland vier Fusion Start-ups, die kommerzielle Fusionskraftwerke entwickeln wollen; drei davon im Industrieverband Pro-Fusion. Weltweit gibt es mehr als 45 solcher Start-ups. Diese haben bereits in dieser frühen Phase der globalen Marktentwicklung mehr als neun Mrd Euro an Kapital zur Verwirklichung ihrer Pläne eingesammelt.

Diese Start-ups haben engagierte Pläne und klare Vorstellungen, wie jedes einzelne von ihnen den Weg zu einem Fusionskraftwerk beschreiten will. Die Roadmaps der Start-ups sind derzeit die einzigen aufgezeigten Wege zu einem Fusionskraftwerk. Im Groben können sie verstanden und zusammengefasst werden, wie in der folgenden Timeline dargestellt.

Start-ups und ihre Investoren stehen im Wettbewerb um den erfolgreichsten Ansatz für die Kernfusion. Um technologische Risiken zu minimieren, sollten daher die verschiedenen Ansätze der Start-ups technologieoffen unterstützt werden. Staatliche Förderung sollte sich an technologischen Meilensteinen und der Mobilisierung privaten Kapitals orientieren, um gezielt die aussichtsreichsten Projekte für erste Fusionskraftwerke zu unterstützen.

2026 – 2028

Politische Entwicklung

- Ausschreibung und Vergabe von Hubs und Demonstratoren durch das BMFTR
- Förderung für F&E Programme sowie für die Skalierung der Produktion von kritischen Komponenten (HTS Tape, Laser, Targets)
- Etablierung industriepolitischer Rahmenbedingungen für die Absicherung der kritischen, kostenintensiven und risikoreichen Demonstrations- und Validierungsphase, bis private Investitionen bzw. Marktmechanismen übernehmen können

Industrielle Entwicklung

- Designstudien und Machbarkeitsstudien für zentrale kleinmaßstäbliche Testanlagen und erste Pilot-Anlagen
- Ausbau bestehender Infrastrukturen (z.B. European XFEL) zur weiteren Technologievalidierung/Skalierung der Technologie
- Bildung von Konsortien unter industrieller Leitung und Beteiligung von Forschungseinrichtungen für neue Demonstrationsanlagen:
 - ICF: Focused Energy, Marvel Fusion, RWE, TU Darmstadt
 - MCF: Proxima, RWE, IPP
- Standortauswahl für den Bau von Kraftwerken durch die Unternehmen/Konsortien
- Beginn des Aufbaus der Hubs mit Testanlagen und F&E-Projekten
- Beginn des Aufbaus der Demonstratoren
- Erste Beschaffungen für Unternehmen der Lieferkette
- Öffentlich-private Partnerschaft für HTS-Band
- Betrieb kleinerer Testanlagen
- Qualifikation entscheidender Lieferkettenpartner und Identifikation erforderlicher Wachstumsrate der Produktionskapazitäten
- Staatlich abgesicherte Investitionen als Hebel zum Aufbau, zur Absicherung und zur Stärkung der industriellen Lieferkettenstruktur
- Vollständiges Design für zentrale Testanlagen und Kraftwerks-Demonstratoren

Wissenschaftliche Entwicklung

- Nachweis zentraler Technologieparameter, die für Fusionsreaktionen und Nettoenergiegewinn relevant sind: z.B. Laser, supraleitende Magnetspulen (werden 2027 abgeschlossen), stationärer Einschluss, Validierung der Stellarator-Optimierung, Validierung eines effizienten Plasmaeinschlusses, Pulsleistung, Targets, etc.

2028 – 2032

Politische Entwicklung

- Die Finanzierung ist gesichert und Designstudien werden als Grundlage für Regulierungskonzepte genutzt
- Förderrichtlinien für FOAK-Kraftwerke werden veröffentlicht
- Fusion wird in die Kraftwerksstrategie integriert

Industrielle Entwicklung

- Betrieb von Testanlagen mit klaren TRL-Stufen⁴ innerhalb der Hubs
- Hochskalierung der Produktionskapazitäten und Risiko-Mapping der Lieferkette, um den wachsenden Bedarf an Schlüsseltechnologien (z.B. Optik, supraleitende Materialien, Leistungselektronik, usw.) zu decken
- Industrielle Serienfertigung von Hochleistungslasern
- Unternehmen beginnen mit dem Bau von Kraftwerken

Wissenschaftliche Entwicklung

- Nachweis der Plasma-(Fusions-)Leistungsbedingungen, die für den Nettoenergiegewinn erforderlich sind
- Nachweis integrierter Subsysteme, Bau/Fertigstellung einer Demo-Anlage (mit Systemen im Vollmaßstab):
 - Integration von Hochfeldmagneten; Heizsysteme, First-Wall-Konzepte, Divertor-/Wärmeabfuhrtests, partielle Tritiumsysteme
 - Lasertreiber/Teamlets, Targetinjektion. Nachweis von Symmetrie, Timing und Fokussierung auf das Target, integrierter Betrieb mit einer Targetkammer, die reaktor-relevant ist
- Entwicklung der nächsten Technologiegeneration (z.B. Werkstoffe, Laser, Targets)

2032 – 2035

Politische Entwicklung

- Finanzierung und staatliche Garantien für Kraftwerke sind verfügbar

Industrielle Entwicklung

- Betrieb großmaßstäblicher Testanlagen
- Fertigstellung und Betrieb von Fusions-Pilotkraftwerken (Fusion Pilot Plant FPP), einschließlich der folgenden Subsysteme:
 - Fusionsmagnete, validierter Divertor, Prototypen zur Wärmeentnahme, stabile Plasmen
 - Integration von Erster Wand/Brutblanket, Flüssigwandkammer, Hochleistungslaser im Dauerbetrieb, Wärmeentnahme, Stromumwandlung, Tritium-Handling-Systemen
- Demonstration des Netto-Strombetriebs im Prototypmaßstab
- Übergang von der Demo-Anlage (FPP) zu einem First-of-a-Kind (FOAK) Fusionskraftwerk.

Wissenschaftliche Entwicklung

- F&E fokussiert auf Effizienz und Entwicklung bewährter Technologien.

Alle Maßnahmen, Förderungen und Entwicklungsaktivitäten sollten mit den Roadmaps der Start-ups koordiniert und bezüglich der Kompatibilität im Hinblick auf das nationale Fusionsziel bewertet und ausgewählt werden, ebenso sollte mit Initiativen anderer Akteure verfahren werden.

Ausgehend von einer anfänglichen technologieoffenen Förderung muss sich ein Start-up im Wettbewerb durchsetzen, um dann weitere Förderung gegebenenfalls alleine zu erhalten. Im Rahmen dieses Wettbewerbs sollen die Technology Readiness Level (TRLs) von unabhängigen wissenschaftlichen Einrichtungen evaluiert werden für alle relevanten Komponenten in der Magnet- und Laserfusion, um eine Weiterentwicklung der Technologien objektiv bewertbar zu machen.

⁴ Sowohl IPCEI als auch der EU Innovation Fund, möglicherweise aber auch nationale Finanzierungsinstrumente, müssen gezielt so weiterentwickelt werden, dass sie auch für Vorhaben zur Anwendung kommen können, die sich noch auf einem niedrigen Technologie-Reifegrad (TRL) befinden und daher noch keine der heute üblichen Nachweise zu Wirtschaftlichkeit, Skalierbarkeit oder Marktreife im Voraus erbringen können. Die Zugangsbedingungen müssen deshalb so gestaltet werden, dass sie ambitionierte, aber realistische Entwicklungsrisiken zulassen und die Eintrittshürden für Deep-Tech-Unternehmen überwindbar bleiben, ohne den Anspruch an Qualität und Wirkung zu senken.

Vorschlag 4:
Förderung technologieoffen, aber wettbewerbl
und im Hinblick auf das nationale Fusionsziel
gestalten

Die verschiedenen Ansätze der Start-ups sollten technologieoffen unterstützt und parallel gefördert werden, um schnellstmöglich ein erstes Fusionskraftwerk errichten zu können. Aktuell können alle technologischen Ansätze nach Einschätzung der Investoren zum Erfolg führen. Um technologische Risiken für das Erreichen eines ersten Fusionskraftwerks zu minimieren, sollte im Wettbewerb ausgeschrieben werden und Technologiepfade ergebnisoffen gefördert werden.

Stärken der deutschen Supply Chain weiterentwickeln

In Deutschland besteht eine starke fusionspezifische Supply Chain. Im Bereich der Magnetfusion ist dies überwiegend dem Aufbau von Wendelstein 7-X und den Lieferungen an ITER zu verdanken. Und auch für die Laserfusion bietet die in Deutschland starke Laser- und Optikindustrie einen enormen Startvorteil. Schließlich ist Deutschland auch mit einer leistungsfähigen Kraftwerksindustrie gut aufgestellt.

Gleichzeitig eröffnen sich zusätzliche Chancen: Weltweit gibt es bislang nur wenige Unternehmen, die hochpräzise Komponenten großer Abmessungen für nukleare Anwendungen herstellen können. Der Rückgang entsprechender Fertigungsindustrien in den vergangenen Jahrzehnten, verursacht durch die Abkehr von der Kerntechnik und eine Schrumpfung der Nuklear-Märkte insgesamt, schafft heute Raum für den Aufbau neuer, hochinnovativer Produktionskapazitäten. Damit bietet sich die Möglichkeit, eine neue industrielle Schlüsselkompetenz aufzubauen, Wertschöpfung zurück nach Europa zu holen und frühzeitig eine führende Rolle in einer entstehenden Zukunftsindustrie zu übernehmen.

Entscheidend für den Start zum Aufbau eines leistungsfähigen Fusionsökosystems im Hinblick auf die Kommerzialisierung der Fusionsenergie ist die Aktivierung der vorhandenen Supply Chain. Allerdings wird dies nicht reichen: die bestehende Supply Chain muss auch rechtzeitig verbreitert und vertieft werden. Der notwendige Kapazitätsaufbau zum späteren Hochfahren der Industrie kann z.B. über die frühzeitige Förderung von

Technologiedemonstratoren oder durch internationale Kooperationen gelingen, um so die Wettbewerbsfähigkeit der beteiligten Unternehmen zu stärken. Dies betrifft u.a.:

- Materialien (z.B. niedrig aktivierbarer Stahl, Supraleitermaterialien und -kabel, Kristalle, etc.),
- Spezielle Fusionskomponenten (z.B. Laser, supraleitende Magnete, Breeding Blankets, Brennstoffkreislauf, Divertorkomponenten, Targets, Hochleistungsoptiken, hochwertige Schmiedestücke, etc.),
- KI, Digital Twins, Remote Maintenance als Beispiele für Technologieentwicklung.

Insgesamt muss der gesamte Aufwand zum Aufbau einer adäquaten Fusions Supply Chain als wesentlicher Erfolgsfaktor zur Erreichung des nationalen Fusionsziel angesehen werden. Dieser Aufwand muss geleistet werden, wenn für die späteren Kraftwerks-Roll-Outs alle kritischen sowie alle wertschöpfungsstarken Komponenten möglichst in Deutschland hergestellt werden sollen.

Dabei sollte grundsätzlich bedacht werden, dass Industrieunternehmen Mehrwert für ihre Anteilseigner schaffen und ihren Gesellschaftern beziehungsweise Aktionären über Investitionen und geplante Aktivitäten Rechenschaft ablegen müssen, wobei auch der Return-on-Invest auf sinnvollen Zeitskalen aufgezeigt werden muss. Investitionen der Supply Chain müssen daher nach wenigen Jahren Gewinne generieren.

Dies ist angesichts des langen Investitionshorizonts beim Aufbau von Fusionskraftwerken nur mit klarer politischer Unterstützung möglich. Über eine finanzielle Absicherung hinaus, wie sie im Abschnitt "Finanzierungsrahmenbedingungen" beschrieben wird, muss daher auch der langfristige Wille zur Finanzierungsbereitschaft politisch eindeutig vermittelt werden. Ein derartiges Engagement ist zwingend notwendig, um sowohl Investitionen seitens Unternehmen der Supply Chain als auch die Berücksichtigung solcher Aktivitäten in der Finanzbranche zu ermöglichen.

**Vorschlag 5:
Bestätigung der langfristigen politischen
Verpflichtung zum Aufbau von
Fusionskraftwerken**

Der Aufbau von Fusionskraftwerken in Deutschland ist nur mit klarer, langfristiger, politischer Unterstützung beim Aufbau der Supply Chain möglich, insbesondere durch sichtbare Verpflichtungsermächtigungen im Bundes- und in Landeshaushalten, sowie mittels konkreter Maßnahmen im Rahmen des Moonshot-Programms.

**Vorschlag 6:
Stärkung der deutschen und europäischen
Supply Chain durch internationale Kooperationen**

Die Politik sollte sich dafür einsetzen, dass verstärkt deutsche und europäische Industrie-Unternehmen weltweit bei der Vergabe von Aufträgen durch Fusions-Start-ups und Forschungseinrichtungen zum Zuge kommen. Dies erfolgt im Rahmen internationaler Kooperationen.

Kooperationen mit Forschungseinrichtungen unter industrieller Führung

Öffentlich finanzierte Forschungseinrichtungen spielen eine herausragende Rolle in der wissenschaftlichen Erforschung der physikalischen Grundlagen sowie in der Weiterentwicklung zentraler Technologien. Eine enge Verzahnung mit Wissenschaftsorganisationen wie Fraunhofer, Max-Planck und Helmholtz stellt einen entscheidenden Standortvorteil für die Entwicklung einer wettbewerbsfähigen Fusionsindustrie in Deutschland dar.

Gleichzeitig sollte die Zusammenarbeit stärker entlang klarer Industrialisierungsziele strukturiert und unter industrieller Führung weiterentwickelt werden. Ziel ist es, Forschungsergebnisse schneller in marktfähige Anwendungen zu überführen, technologische Skalierung zu ermöglichen und den Aufbau industrieller Produktions- und Lieferketten gezielt zu unterstützen.

Eine koordinierte Ausrichtung von Forschungsinitiativen an den Anforderungen der industriellen Umsetzung stärkt Innovationszyklen, reduziert Transferverluste

und erhöht die internationale Wettbewerbsfähigkeit des Wirtschaftsstandorts Deutschland. Dabei bleibt die wissenschaftliche Exzellenz als Grundlage, während die strategische Verzahnung mit industriellen Roadmaps sicherstellt, dass Forschungsergebnisse schneller in konkrete Anwendungen und industrielle Wertschöpfung überführt werden. Eine mögliche Unterstützung industrieller Roadmaps durch staatliche Einrichtungen der Grundlagenforschung sollte daher Inhalt eines Austauschs der Bundesregierung mit den Wissenschaftsorganisationen sein.

**Vorschlag 7:
Kooperationen mit Forschungseinrichtungen
entlang klarer Industrialisierungsziele**

Die enge Kooperation zwischen Industrie und Forschungseinrichtungen sollte zur Weiterentwicklung der Fusion intensiviert werden. Dabei sollten zukünftige Forschungsförderungen im Bereich der Fusionsforschung aber gezielt auf den Bau eines Fusions-Kraftwerks ausgerichtet sein, um die technologische Entwicklung entlang entwickelter Roadmaps zu unterstützen.

Finanzierungsrahmenbedingungen

MEILENSTEIN- UND LEISTUNGSBASIERTES FINANZIERUNGSTRUMENTARIUM

Zur Finanzierung der Erreichung des nationalen Fusionsziels müssen sehr unterschiedliche Finanzierungsformen angedacht, gezielt kombiniert, und dem jeweiligen Entwicklungsstand von Projekten angepasst werden. Einige davon dienen einer Anschubfinanzierung, während andere eher einen kompensatorischen Charakter haben, indem sie erst bei Erreichung von definiten Sub-Zielen, also rückwirkend, bereitgestellt werden, um bereits von anderen (z.B. privaten Investoren) vorgestreckte Finanzierungen auszugleichen. Wieder andere repräsentieren keine unmittelbaren staatlichen Zuwendungen, sondern dienen der Absicherung privater Finanzierungen.

Die Erreichung des nationalen Fusionsziels erfordert daher ein umfassendes Finanzierungsinstrumentarium, welches entlang der gesamten Innovations- und Industrialisierungskette wirkt, dabei aber die besonderen Anforderungen von Deep-Tech-Innovationen berücksichtigen, wo nötig phasenspezifisch ausgelegt,

und vor allem abgestimmt sein muss. Ein solches Instrumentarium wird:

- frühe Entwicklungsphasen durch Zuschüsse und staatlich flankierte Eigenkapitalinstrumente unterstützen;
- Demonstrationsanlagen, Infrastruktur und industrielle Skalierung durch kreditbasierte und staatlich abgesicherte Finanzierungsmodelle ermöglichen;
- private Investitionen durch Garantien, Risikoübernahmeinstrumente und zinsgünstige Darlehen mobilisieren und absichern;
- kompensatorische Förderinstrumente einsetzen, die Fortschritt und technologische Durchbrüche gezielt honorieren;
- bestehende europäische Programme wie IPCEI und den EU Innovation Fund strategisch einbinden; und
- Zugangsbedingungen an die Realitäten von Deep-Tech-Entwicklungen anpassen, insbesondere bei niedrigen Technologie-Reifegraden (TRL).

Vorschlag 8:

Aufsetzen eines anpassbaren Finanzierungsinstrumentariums für Fusion

Zur Erreichung des nationalen Fusionsziels sollte Deutschland ein z.B. an Projektphasen und Scale-Ups anpassbares und abgestimmtes Finanzierungsinstrumentarium aufsetzen, welches aus Zuschüssen, Eigenkapital-, Kredit- und Garantieinstrumenten sowie europäischen Förderprogrammen bestehen kann, und welches gezielt auf Fusion (und möglicherweise) andere Deep-Tech-Technologien ausgerichtet ist.

Vorschlag 9:

Beitritt IPCEI für Fusionstechnologien

Deutschland tritt dem IPCEI für innovative Nukleartechnologien bei.

Nur durch den koordinierten Einsatz eines solchen, den speziellen Notwendigkeiten angepassten Instrumentariums kann die Industrialisierung der Fusionsenergie effizient, wettbewerbsfähig und nachhaltig umgesetzt werden.

Die Anwendung einzelner Finanzierungsinstrumente sollte zudem abhängig gemacht werden von dem Erreichen klar definierter Meilensteine, an denen Mittel stufenweise

und ausschließlich bei nachgewiesenem Fortschritt freigegeben werden. Dieses Prinzip ist international seit Langem etabliert, etwa in der Raumfahrt- und Verteidigungsforschung in den USA. Indem sichergestellt wird, dass staatliches Kapital dort wirkt, wo es tatsächlich technologischen Fortschritt und Skalierung ermöglicht, schafft es Tempo, Fokus und Ergebnisorientierung, reduziert Fehlanreize, und mitigiert das staatliche Risiko.

Diese Meilensteine werden zwischen dem/r zentralen Koordinator/in und dem jeweiligen Stakeholder abgestimmt und zeitlich sowohl entlang der Stakeholder Roadmap als auch im nationalen Umsetzungsplan geplant. Somit wird Kohärenz, Vergleichbarkeit und strategische Zielorientierung über alle geförderten Vorhaben hinweg sichergestellt.

Vorschlag 10:

Zuwendungen in Abhängigkeit des Erreichungsgrades von abgestimmten Meilensteinen

Staatliche Förderung sollte von der Erreichung inhaltlich sinnvoller und – bezüglich Ihrer Bewertung (erreicht/nicht-erreicht) – eindeutig messbarer Meilensteine abhängig gemacht werden. Vorgehensweisen bei z.B. zeitlichen Verzügen sind vorab abzustimmen. Die Abstimmung der Meilensteine bzgl. dem nationalen Fusionsziel wäre Aufgabe des/r zentralen Koordinators/in.

Bei der Definition der Meilensteine sollten insbesondere die Kriterien beschrieben und vereinbart werden, nach denen bei der zeitlichen Erreichung der Meilensteine beurteilt werden kann, ob diese auch inhaltlich erreicht wurden. Diese Kriterien sollten entsprechend der internationalen Standards als WACO (Work and Completion Objectives) ausformuliert sein. Auch sollten Vorgehensweisen für den Umgang mit Verzögerungen, Zielabweichungen oder notwendigen Anpassungen vorab verbindlich festgelegt werden. Zur Messung des Erreichungsgrades dieser Meilensteine sollten Peer Reviews zum Einsatz kommen.

Wo Ziele nicht erreicht werden, werden Projekte konsequent angepasst oder sogar beendet. Staatliches Geld folgt also dem Fortschritt – nicht umgekehrt.

Insgesamt schafft eine solche Meilenstein-Systematik Planungssicherheit für alle Stakeholder, stärkt die Steuerungsfähigkeit des Moonshot-Programms und stellt sicher, dass öffentliche Mittel wirkungsorientiert eingesetzt werden.

Insbesondere für eine stärkere Technologieförderung, die angesichts des Grundlagenforschungscharakters der Fusion notwendig ist, sollten nicht nur die bestehenden Fördermechanismen angewandt werden, sondern die beschriebene Meilenstein-Systematik sollte zur Anwendung kommen, um die gewünschte Technologieoffenheit möglichst lange zu erhalten.

FÖRDERUNG DER SUPPLY CHAIN DURCH FINANZIERUNGS-ABSICHERUNGEN

Für die Förderung von Projekten entlang der Fusions-Supply-Chain muss zur Erreichung des nationalen Fusionsziels ein gezielter Einsatz industriepolitischer Instrumente erfolgen, die für die Unternehmen der Supply Chain Planungssicherheit geben, Investitionsrisiken reduzieren und die Kapitalbeschaffung erleichtern. Dazu zählen insbesondere Exportkreditgarantien, Investitions Garantien, Projektfinanzierungsabsicherungen sowie weitere staatlich flankierte Finanzierungsinstrumente.

Ziel dieser Instrumente ist es, Unternehmen entlang der Lieferkette in die Lage zu versetzen, frühzeitig Produktionskapazitäten aufzubauen, neue Fertigungstechnologien zu entwickeln und sich auf die Anforderungen der entstehenden Fusionsindustrie einzurichten. Gerade in der frühen Industrialisierungsphase entstehen hohe Investitionsbedarfe bei gleichzeitig begrenzter Markttransparenz und technologischen Risiken. Staatlich unterstützte Risikoabsicherungen können hier entscheidend dazu beitragen, private Investitionen zu mobilisieren und industrielle Skalierung zu ermöglichen.

Sämtliche verfügbaren Instrumente zur Absicherung industrieller Investitionen sollten systematisch geprüft und – sofern erforderlich – an die besonderen Anforderungen der entstehenden Fusionsindustrie angepasst werden. Dazu gehören insbesondere Mechanismen zur Absicherung von Technologie- und Skalierungsrisiken und zur Stabilisierung von Projektfinanzierungen.

Als Orientierung können auch industriepolitische Finanzierungsmodelle dienen, wie sie beispielsweise beim Aufbau der europäischen Luftfahrtindustrie angewendet

wurden. Übertragen auf die Fusionsindustrie bedeutet dies, dass private Investitionen in Schlüsseltechnologien, Infrastruktur und Produktionskapazitäten zunächst durch staatlich flankierte Finanzierungsinstrumente unterstützt werden. Mit zunehmender Marktreife und kommerziellem Betrieb können solche Förderinstrumente schrittweise zurückgeführt oder über langfristige Beteiligungs- und Rückzahlungsmechanismen refinanziert werden.

Schließlich sollte sich der Staat auch als früher Ankerkunde für Schlüsselkomponenten aus der Supply Chain positionieren, um damit erste industrielle Serien zu ermöglichen und somit Marktreife zu erlangen. Gerade in der Industrialisierungsphase ist das entscheidend: Ein staatlicher Ankerkunden-Ansatz reduziert technologische und kommerzielle Skalierungsrisiken, schafft Planungssicherheit, mobilisiert privates Kapital und hilft, eine wettbewerbsfähige Lieferkette aufzubauen. Damit übernimmt der Staat die Rolle eines strategischen Risikoabsicherers und Finanzierers in der entscheidenden Phase der Industrialisierung.⁵

HEBELUNG DURCH UND VON VENTURE CAPITAL

Angesichts des im Vergleich zum angelsächsischen Raum weniger ausgeprägten Kapitalmarkts in der Europäischen Union ist eine Kofinanzierung des Fusionsökosystems von privatem und öffentlichem Kapital als erfolgskritisch einzustufen.

Die angesprochene öffentliche Förderung ermöglicht es insbesondere den Deep Tech Unternehmen, privates Kapital in Finanzierungsrunden einzuwerben, wenn durch politische Rückendeckung sowie die staatliche Unterstützung für Forschung und Entwicklung Investitionsrisiken minimiert werden. Gleichzeitig reduzieren private Beteiligungen Risiken für staatliche Zuwendungsgeber und stellen einen wirtschaftlichen Umgang mit bewilligten Fördermitteln sicher.

Für die Eigenkapitalfinanzierung durch Venture Capitals wäre ein spezifisches Programm für Fusionstechnologie im Zukunftsfonds der KfW Capital denkbar. Zudem sollte geprüft werden, ob der im Dezember 2025 angekündigte Deutschlandfonds zur Finanzierung der Fusionsentwicklung beitragen kann. Wichtig ist dabei, öffentliche Mittel konsequent durch private Finanzierung zu ergänzen und zu hebeln (z.B. nach dem Modell der WIN-Initiative bzw. des Wachstumsfonds Deutschland mit institutionellen Investoren). Leider beschränkt die gegenwärtige Gesetzeslage die Investitionen von Versicherungsunternehmen und Pensionskassen in

⁵ Internationale Beispiele – insbesondere aus den USA in Bereichen wie Raumfahrt, Luftfahrt oder Pharma – zeigen, dass staatlich abgesicherte Finanzierungsinstrumente entscheidend dazu beitragen, die kritische Demonstrations- und Validierungsphase zu überbrücken. Dabei geht es nicht um klassische Subventionierung, sondern um die gezielte Absicherung von First-of-a-kind-Risiken, um Industrialisierung zu ermöglichen, Lieferketten aufzubauen und private Investitionen in großem Umfang zu mobilisieren.

Venture Capital und Venture Debt sehr. Eine geeignete Anpassung könnte erhebliches Kapital für Co-Investments z.B. in Modelle wie den Deutschlandfonds erleichtern und somit den Kapitalbedarf reduzieren, den die öffentliche Hand aufbringen muss.

**Vorschlag 11:
Auflage/Erweiterung des Wachstumsfonds
Deutschland für Fusionsinvestitionen**

Privates Kapital könnte öffentliche Mittel ergänzen und somit den Finanzbedarf aus öffentlichen Haushalten für das nationale Fusionsziel reduzieren. Dazu ist zu prüfen, ob der Wachstumsfonds Deutschland für Fusionsinvestitionen genutzt werden kann, ggf. durch entsprechende Erweiterung.

**Vorschlag 12:
Anpassung Investitionsvorschriften für
Versicherungen u.ä. Kapitalverwalter**

Es sollte insbesondere geprüft werden, inwieweit die geplanten Änderungen in der Kapitalmarktregulatorik für institutionelle Anleger in Deutschland dafür genutzt werden können, die Entwicklung der Fusionstechnologie zu unterstützen. Dabei steht das Versicherungsaufsichtsgesetz (VAG) und besonders die Anlageverordnung im Blickpunkt. Denkbar wäre eine Öffnung der neu geordneten Infrastruktur-Quote und/oder eine Verbesserung der Bedingungen für einheimisches Venture Capital.

Regulatorik und Normung

REGULIERUNG IM STRAHLENSCHUTZGESETZ

In Zusammenhang mit der Entwicklung von Reaktoren für einen kommerziellen Betrieb der Kernfusion entsteht die Notwendigkeit einer staatlichen Regulierung für den Bau, Betrieb, Rückbau und Entsorgung von Fusionsreaktoren und deren Materialien, die im Einklang mit Sicherheit, Umwelt- und Gesellschaftsinteressen Innovationen fördert. Mit dem nationalen Fusionsziel, das erste Fusionskraftwerk in Deutschland zu bauen, entsteht für Deutschland eine erhöhte Dringlichkeit, eine entsprechende Regulatorik aufzubauen, denn diese steht am Anfang des Designprozesses für zukünftige Reaktoren. Neben technischen Aspekten spielt aber auch die nachhaltige, gesellschaftliche Akzeptanz der Nutzung der Kernfusion eine wichtige Rolle: öffentlich zugängliche

Informationen über Sicherheitskonzepte, Risiken und Nutzen der Fusion tragen dazu bei, Ängste abzubauen und eine sachliche Debatte zu ermöglichen. Sicherheit gemäß dem ALARA Prinzip („As Low As Reasonably Achievable“) ist eine zentrale Aufgabe aller Beteiligten an Entwicklung, Bau und Regulierung zukünftiger Fusionskraftwerke.

Ein zentrales Ziel staatlicher Regulatorik für Fusionskraftwerke in Deutschland besteht deshalb darin, ein eigenes rechtliches Rahmenwerk zu schaffen, das sich zwar an bestehenden Atom- und Energierichtlinien orientiert, aber die besonderen Eigenschaften der Fusion berücksichtigt. Dass hier als Basis für die Regulierung der Kernfusion vom bestehenden Strahlenschutzgesetz ausgegangen wird, und nicht vom Atomgesetz, betrachtet Pro-Fusion als eine richtige und gleichzeitig wesentliche Wegweisung. Nach bestehender Gesetzeslage haben Fusionsanlagen keine Kernbrennstoffe und sind keine kerntechnischen Anlagen im Sinne des Atomgesetzes. Vielmehr handelt es sich um Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung mit sonstigen radioaktiven Stoffen, wie sie im Strahlenschutzgesetz erfasst sind. Auch aus technischer Sicht ist dieser Ansatz sinnvoll: die Fusionsanlage erzeugt im Gegensatz zur Kernspaltung keine Kettenreaktion und kein langlebiges hochradioaktives Abfallmaterial. Dennoch entstehen Risiken durch hohe Energiedichten, starke Magnetfelder, Materialaktivierung durch Neutronenstrahlung sowie den Umgang mit Tritium. Ausgehend vom Strahlenschutzgesetz sollte die zukünftige Regulatorik daher spezifisch auf diese Gefahren zugeschnitten sein.

**Vorschlag 13:
Aufnahme von Fusionsanlagen in das
Strahlenschutzgesetz**

Satz 1 am Ende des § 5 Abs. 2 StrlSchG sollte ergänzt werden um den Text: „und Anlagen zur Fusion von Atomkernen.“, um Fusionsanlagen im deutschen Strahlenschutzgesetz zu verankern.

Ein wichtiger Bereich ist das Genehmigungsverfahren, welches in Deutschland aufgrund der föderalen Struktur besonders komplex ist. Zwischen Bund und Ländern abgestimmte, mehrstufige Zulassungsprozesse zu etablieren, die getrennt Standortwahl, technische Auslegung, Notfallkonzepte und Rückbaupläne umfassen, und zwar immer erst auf einer hohen Stufe mit relativ umfassenden Vorgaben, dann über weitere, tiefere Stufen zu immer detaillierteren Vorgaben, könnte hier ein Weg sein.

Zwar müssten bereits in der Planungsphase Betreiber für die höchste Stufe nachweisen, dass sie Sicherheitskonzepte, Strahlenschutzmaßnahmen und Tritium-Kontrollsysteme implementieren, aber wenn die Regulatorik nur stufenweise erweitert wird, dabei aber auf jeder Stufe transparent bleibt, kann Investoren Planungssicherheit geboten werden, ohne die wirtschaftliche Entwicklung von Technologien zu blockieren.

Ein gestuftes technisches Regelwerk ermöglicht es auch ggfs. unterschiedliche Risiken der unterschiedlichen technologischen Konzepte für Fusionskraftwerke adäquat zu behandeln. Schließlich sollte staatliche Regulierung nicht nur kontrollierend, sondern auch fördernd wirken. Neben Aufsicht und Genehmigung können Förderprogramme, steuerliche Anreize und Forschungspartnerschaften etabliert werden, um Innovation zu beschleunigen. Ziel ist ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Sicherheit, wirtschaftlicher Tragfähigkeit und technologischem Fortschritt.

Insgesamt wird die staatliche Regulierung zukünftiger kommerzieller Fusionsreaktoren eine Schlüsselrolle dabei spielen, ob diese Technologie ihr Potenzial als sichere, nachhaltige Energiequelle entfalten kann. Zwar besteht erhebliche Dringlichkeit in Deutschland für dieses Thema, dennoch muss immer berücksichtigt werden, dass nur ein flexibles, transparentes und international abgestimmtes Regelwerk dazu beitragen kann, für Deutschland auch Exportmärkte zu erschließen.

Sicherheit von Fusionskraftwerken ist wesentliche Aufgabe aller Beteiligten. Bei Organisation und regulatorischer Anforderung ist der Staat gefordert. Als Basis für die Regulierung ist das Strahlenschutzgesetz geeignet, und die Fusion sollte explizit im Gesetz aufgeführt werden. Damit würden Kernfusionsanlagen in das Strahlenschutzgesetz integriert, wie von der Bundesregierung angestrebt.

Vorschlag 14:
Entwicklung einer adäquaten und abgestuften Regulatorik

Ausgehend vom Strahlenschutzgesetz sollte die Regulatorik für die Nutzung der Fusionsenergie stufenweise aufgebaut werden. Bei der Konzepterstellung für kommerzieller Fusionskraftwerke kommt dabei nur das Regelwerk auf der höchsten Stufe zur Anwendung, während

die Regulatorik auf ihren tieferen Stufen erst nach und nach im Designprozess berücksichtigt werden muss. Dabei bleibt jeder Stufe vollkommen transparent.

GENEHMIGUNGSPROZESS

Darüber hinaus ist eine rechtliche Klärung und eine Ausgestaltung der untergeordneten Detailvorschriften dringend angezeigt. Für eine sichere, eindeutige und effektive Umsetzung wird eine Organisation benötigt mit klaren Ansprechpartnern und Entscheidungsträgern für die Industrie.

In Deutschland konnte man in den vergangenen Jahren bei sehr langdauernden Projekten beobachten, dass im Projektverlauf Regelungen und Normen turnusgemäß angepasst wurden. Dies bedeutete, dass alle Nachweise im Rahmen des Qualitätsmanagements entsprechend erneut erbracht werden mußten. Pro-Fusion schlägt daher für den Bau von Fusionskraftwerken vor, dass die bei Baugenehmigung (oder vergleichbaren Verwaltungsakten) gültigen Regelungen und Normen auch für die Abnahme am Ende gültig bleiben, es sei denn, sie betreffen signifikante Sicherheitsverbesserungen.

Vorschlag 15:
Harmonisierung der Fusions-Regulatorik

Die Fusions-Regulatorik sollte zumindest innerhalb Deutschlands, besser in Europa, harmonisiert werden, um einen späteren Rollout von Kraftwerken zu erleichtern und für Deutschland Exportmärkte zu erschließen.

Vorschlag 16:
Rechtssicherheit durch Verbindlichkeit von Vorschriften zum Genehmigungszeitraum

Redaktionelle Anpassungen an Regelungen und Normen sollten nur dann zwingend im Projektverlauf adaptiert werden, wenn sie explizit die Sicherheit verbessern. Damit wird eine aufwändige Anpassung der Konstruktion an nur redaktionell abgeänderte Regelungen und Normen vermieden und das Qualitäts- und Konfigurationsmanagement erleichtert.

INTERNATIONALE STANDARDISIERUNG

Mit dem absehbaren Übergang der Kernfusion von der experimentellen Forschung hin zur kommerziellen Anwendung gewinnt die internationale Normung zunehmend an Bedeutung. Während Fusionsanlagen bislang überwiegend in Forschungsumgebungen betrieben werden, erfordert ihr zukünftiger Einsatz als industrielle Energiequelle klare, verlässliche und international harmonisierte Standards. Eine frühzeitige Normung kann dabei nicht nur Sicherheit und Qualität gewährleisten, sondern auch Marktbarrieren reduzieren, Investitionen fördern und technologische Entwicklungen beschleunigen.

Auf internationaler Ebene ist insbesondere die ISO als Plattform für globale Normung von Bedeutung. Die Einrichtung eines ISO Sub-Committees für Fusionstechnologie stellt einen logischen Schritt dar, um die wachsende technologische und wirtschaftliche Relevanz der Fusion strukturiert abzubilden.

Es kann derzeit beobachtet werden, dass globale Player die ISO-Normungsausschüsse mit fusionstechnologischen Entwürfen füttern. In diesem Kontext verfolgt das Deutsche Institut für Normung (DIN) den Anspruch, die Leitung dieses ISO-Sub-Committees zu übernehmen. Die Führung eines ISO-Sub-Committees erlaubt es, die Strukturierung der Themenfelder aktiv mitzugestalten, relevante Stakeholder frühzeitig einzubinden und Schnittstellen zu bestehenden Normen aus Energie-, Sicherheits- und Anlagenbau zu harmonisieren. Dadurch kann vermieden werden, dass Fusionsnormen isoliert entstehen oder unpassend aus anderen Bereichen übernommen werden.

Der Wunsch der DIN, dieses Gremium zu führen, ist sowohl fachlich als auch strategisch begründbar. Deutschland verfügt über langjährige Expertise in der Fusionsforschung und eine starke industrielle Basis in den Schlüsselbereichen Maschinenbau, Elektrotechnik, Werkstofftechnik, Kryotechnik und Automatisierung. Darüber hinaus hat das DIN umfassende Erfahrung in der Koordination komplexer Normungsvorhaben auf europäischer und internationaler Ebene. Da derzeit kaum nennenswerte Umsätze mit Fusionstechnologien erwirtschaftet werden, fällt es allerdings industriellen Playern schwer, Erfahrungsträger zur Mitarbeit von Normen abzustellen, die noch keine Auswirkungen auf die Unternehmen haben.

Strategisch bietet die Leitung eines solchen Sub-Committees auch industriepolitische Chancen. Normen prägen Märkte: Wer Standards mitentwickelt, beeinflusst technische Ausrichtungen, Schnittstellen und Qualitätsanforderungen. Für den europäischen und insbesondere deutschen Industriesektor eröffnet dies die Möglichkeit, eigene technologische Stärken frühzeitig in internationale Rahmenwerke einzubringen und Wettbewerbsfähigkeit im entstehenden Fusionsmarkt zu sichern.

Gleichzeitig trägt eine vom DIN koordinierte Normungsarbeit dazu bei, die Akzeptanz der Fusionsenergie zu erhöhen. Transparente, nachvollziehbare und international abgestimmte Standards schaffen Vertrauen bei Behörden, Investoren und Öffentlichkeit. Sie zeigen, dass der Übergang von der Forschung zur Anwendung nicht ungeregt erfolgt, sondern auf klaren Qualitäts-, Sicherheits- und Umweltprinzipien basiert.

Insgesamt wird die Normung eine Schlüsselrolle für den Erfolg kommerzieller Fusionsreaktoren spielen. Sie bildet die Brücke zwischen wissenschaftlicher Innovation und industrieller Umsetzung. Der Anspruch des DIN, das entsprechende ISO-Sub-Committee zu führen, ist vor diesem Hintergrund nicht nur Ausdruck nationaler Kompetenz, sondern auch ein Beitrag zur strukturierten, sicheren und marktfähigen Entwicklung der Fusionsenergie auf globaler Ebene.

Vorschlag 17: Anstreben der Führung des ISO Sub-Committees für Fusionstechnologie

Die Bundesregierung und die Industrie streben in einer konzertierten Aktion an, dass Deutschland die Führung des ISO Sub-Committee für Fusionstechnologie zugesprochen wird. Dazu nimmt die Bundesregierung auf die Mitglieder der ISO politisch Einfluss.

Vorschlag 18: Aktive Förderung der internationalen Fusions- Standardisierung

Zumindest für eine Anfangszeit sollte eine (Teil-)Finanzierung für die Mitarbeit industrieller Erfahrungsträger in Normungsausschüssen zur Kernfusion bereitgestellt werden, um die Interessen Deutschlands dort besser und stärker vertreten zu können.

Digitale Anwendungen bei der Industrialisierung der Kernfusion

QUERSCHNITTLICHE NUTZUNG DER KI

Ein zentrales Anwendungsfeld von KI liegt in der Plasmaüberwachung und -steuerung sowie der Optimierung von Reaktordesigns und Materialien. Die Entwicklung von Fusionsreaktoren erfordert komplexe Simulationen zu Magnetfeldern, Plasmadynamik, Wärmeflüssen und Materialbelastungen. KI kann hier als Beschleuniger wirken, indem sie physikalische Simulationen approximiert oder Designräume effizient durchsucht.

Auch in der Produktion und Wartung zukünftiger Fusionskraftwerke spielt KI eine bedeutende Rolle. So werden z.B. die Einsatzmöglichkeiten der KI für eine verbesserte Einhaltung der in der Fusion so wichtigen Toleranzgenauigkeiten bei Schweißprozessen untersucht.

Darüber hinaus unterstützt KI die Wissensintegration und -übertragung innerhalb und zwischen der Industrie und der Forschung. Die Fusionsforschung erzeugt riesige Datenmengen aus Experimenten, Simulationen und internationalen Projekten. KI-Systeme können helfen, dieses Wissen zu strukturieren, Hypothesen zu generieren und Erkenntnisse schneller in industrielle Anwendungen zu überführen. Dadurch wird die Lücke zwischen Laborerfolg und marktfähiger Technologie verkleinert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Künstliche Intelligenz nicht nur ein Hilfswerkzeug, sondern ein strategischer Schlüssel für die Industrialisierung der Kernfusion ist. Als querschnittliche Technologie durchdringt sie praktisch alle relevanten Bereiche und beschleunigt dadurch Entwicklungszyklen, erhöht die Betriebssicherheit und trägt maßgeblich zur wirtschaftlichen Machbarkeit bei. Ohne KI wird der Weg zur kommerziellen Fusionsenergie deutlich länger und teurer sein – mit ihr rückt eine neue Ära der Energieerzeugung in greifbare Nähe. Schließlich sollte auch nicht vergessen werden, dass die KI mit ihrem sehr großen Energiebedarf langfristig nicht überleben wird, wenn dieser Bedarf nicht durch die klimaneutrale Kernfusion gedeckt werden kann.

Wegen der überragenden Bedeutung der KI für einen beschleunigten Prozess hin zu einem ersten industriellen Fusionskraftwerk schlägt Pro-Fusion vor, dass staatliche Fördermittel, die allgemein für die KI vorgesehen sind, auch für Anwendungen in der industriellen Fusionsentwicklung zugänglich gemacht werden.

Vorschlag 19:

Aktive Nutzung von Fördermitteln zur Entwicklung der KI auch für Anwendungen in der industriellen Fusionsentwicklung

Synergien zwischen den allgemeinen Möglichkeiten der KI einerseits und der industriellen Fusionsentwicklung andererseits sollten systematisch untersucht und identifiziert werden, um diese Synergien dann durch gezielte Förderung zu heben.

STRATEGISCHE NUTZUNG ÖFFENTLICHER SUPERCOMPUTER-KAPAZITÄTEN

Ebenso ist eine Unterstützung für industrielle Forschung im Bereich von rechenintensiven Modellierungen in Form von verbesserten Zugängen von öffentlich geförderten Rechenzentren sinnvoll. Mit dem Forschungszentrum Jülich und dem dortigen Supercomputer JUPITER verfügt Deutschland über einen der leistungsstärksten Supercomputer der Welt. Ebenso stehen über vorhandene Vorgänger, wie JULES BOOSTER, wesentliche Kapazitäten zur Verfügung. Eine Unterstützung für industrielle Forschung im Bereich von rechenintensiven Modellierungen in Form von verbesserten Zugängen zu öffentlich geförderten Rechenzentren würde die Entwicklung von Fusionsmodellen unterstützen und Kapazitäten in Deutschland erhalten.

Vorschlag 20:

Strategische Nutzung von Supercomputer Kapazitäten

Der Staat sollte für Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Bereich der Kernfusion einen gleichwertigen Zugang zu Rechenkapazitäten wie für wissenschaftliche Projekte ermöglichen und vorhandene Kapazitäten für die Nutzung durch Fusionsunternehmen weiter unterhalten.

DIGITALE ZWILLINGE

Aufgrund der hohen Komplexität, der engen Toleranzen und der extremen Betriebsbedingungen ist eine durchgängige digitale Abbildung aller fusionsrelevanter Systeme im Kraftwerk erforderlich. Digitale Zwillinge spielen hier eine zentrale Rolle für Entwicklung, Betrieb und langfristige Verfügbarkeit. Digitale Zwillinge ermöglichen die vorausschauende Auslegung, die kontinuierliche Zustandsüberwachung, die Optimierung von Betriebsparametern sowie die frühzeitige Erkennung

von Degradation und Fehlentwicklungen. Insbesondere erlauben sie eine prädiktive Wartung, welche die hohen Belastungen während des Dauerbetriebs berücksichtigt, die Minimierung ungeplanter Stillstände und die Bewertung von Design und Betriebsentscheidungen über den gesamten Lebenszyklus.

Vorschlag 21:
Förderung der Entwicklung von Digitalen Zwillingen für fusionsrelevante Systeme

Der Staat sollte die Entwicklung hochauflösender, physikbasierter und datengetriebener digitaler Zwillinge für fusionspezifische gezielt fördern, sowie deren Validierung an realen Test und Demonstrationsanlagen unter kraftwerksnahen Bedingungen.

Projektmanagement, Systems Engineering, Konfigurationsmanagement

Die Planung und der Bau eines Fusionskraftwerkes verlangen eine äußerst effektive und effiziente Abstimmung zwischen den verschiedenen Projektbeteiligten. Dies ist notwendig, um unter den komplexen technischen, räumlichen und genehmigungsrechtlichen Rahmenbedingungen die Entwicklung und Konstruktion zielgerichtet voran treiben zu können. Ohne entsprechende Strukturen, die diese Komplexität beherrschbar machen, entstehen ineffektive und ineffiziente Entwicklungen, die einen immensen Ressourcenaufwand bewirken, der vermeidbar wäre. Begleitend zu allen Förderungen im Hinblick auf technische und technologische Entwicklungen schlägt Pro-Fusion daher vor, auch den Aufbau der entsprechenden Strukturen im Bereich des Projektmanagements, des Systems Engineering und des Konfigurationsmanagements frühzeitig zu fördern, insbesondere bezüglich der dazu notwendigen IT-Infrastrukturen und der Heranbildung entsprechender Kompetenzen.

Vorschlag 22:
Frühzeitige Förderung der Entwicklung geeigneter Strukturen für das Projektmanagement, das Systems Engineering und das Konfigurationsmanagement

Es wird die Entwicklung zukunftsweisender Methoden, Prozesse und Tools für das Projektmanagement, das Systems Engineering und für das Konfigurationsmanagement, die während der Entwicklung eines Fusionskraftwerks massiv zum Einsatz kommen, frühzeitig gefördert, so dass diese bereits während des Baus von Demonstratoren und Prototypen validiert werden können.

Technologische Agenda

Materialentwicklung

HOCHBEANSPRUCHTE OBERFLÄCHEN

Hochbeanspruchte Oberflächen, wie z. B. die der First Wall, sind nicht nur hohen Temperaturen und Neutronenstrahlung ausgesetzt, sondern auch dem Beschuss durch schwere Teilchen. Dies erfordert die Entwicklung von Schutzbeschichtungen, die diesen Belastungen möglichst lange standhalten. Obwohl die am KIT (Karlsruher Institut für Technologie) entwickelten funktional graduierten Wolfram-Stahl-Schutzbeschichtungen inzwischen industriell gefertigt werden und einen Technologie-Reifegrad (TRL) von 3 erreicht haben, sind noch einige F&E-Arbeiten erforderlich, um sie für die Anwendung geeignet zu machen. Dazu gehört die Entwicklung technologischer Lösungen, die eine Skalierung auf First-Wall-Größe und -Form sowie eine Massenproduktion der First Wall bei ausreichender Qualität ermöglichen. Auch das Verhalten der Beschichtungen unter anwendungsnahen Bedingungen, insbesondere unter Neutronenbestrahlung, muss untersucht und charakterisiert werden. Ziel ist es, einen TRL von 5 und höher zu erreichen.

STRAHLUNGSINDUZIERTE MATERIALVERSPRÖDUNG

Die strahlungsinduzierte Versprödung von Fusionsmaterialien durch 14-MeV-Fusionsneutronen wird unter bestimmten Betriebsbedingungen und -dauern unvermeidbar sein. Daher sollten F&E-Anstrengungen darauf abzielen, das Wissen in diesem Bereich zu erweitern – sowohl für Grundwerkstoffe als auch für deren Schweißverbindungen. Dies erfordert umfangreiche Bestrahlungsprogramme in Kernspaltungsreaktoren und (z. B. Spallations-) Neutronenquellen sowie in Bestrahlungseinrichtungen mit einem fusionsrelevanten Spektrum, wie IFMIF-DONES, sobald diese verfügbar sind.

Die damit verbundenen Post-Irradiation-Studien sollen die für die Qualifizierung dieser Materialien und die Genehmigung der daraus gefertigten Komponenten notwendigen Auslegungsdaten erzeugen.

AKTIVIERUNGSMINIMIERUNG

In der Fusionsfertigung eingesetzte Materialien, insbesondere solche, die Neutronenstrahlung ausgesetzt sind, sollten ausschließlich aus niedrig aktivierbaren Elementen bestehen und innerhalb zulässiger Toleranzgrenzen für Verunreinigungen – verursacht durch mittel- oder hoch aktivierbare Elemente – gefertigt werden. Letzteres erfordert die Verfügbarkeit und Technologie entsprechend sauberer Fertigungsanlagen. Eine weitere Maßnahme zur Minimierung radioaktiver Materialien ist die Auslegung von Komponenten hinsichtlich Dauerhaftigkeit, Reparatur, Handhabung und Recycling. Ziel sollte sein, den Bedarf an Zwischen- und Endlagerstätten auf ein Minimum zu reduzieren – idealerweise ihn vollständig zu eliminieren.

Kritische Komponenten umfassen Co, Ni, Nb, Mo, Al, Cu und andere Übergangsmetalle und Verunreinigungen, die persistente Aktivierungsprodukte erzeugen und die Abfallklassifizierung verschlechtern. Die Industrie muss befähigt werden, Materialien herzustellen und bereitzustellen, die diese kritischen Komponenten minimieren. Der Aufbau einer Hochvolumen-Lieferkette betrifft auch keramische Materialien (z.B. SiC/SiC), die neben Vorteilen bei der Aktivierungsminimierung auch Vorteile hinsichtlich Versprödung bieten und potenziell höhere Temperaturen ermöglichen.

HANDLUNGSVORSCHLÄGE

Da derzeit keine Hochleistungs-Neutronenquellen mit dem geeigneten Energiespektrum verfügbar sind, konnte bisher nur eine begrenzte Anzahl von Materialien getestet und qualifiziert werden. Es ist daher sicherlich hilfreich, sich mit anderen Akteuren in der Welt zu vernetzen und Synergien zu nutzen. Die britische UKAEA ist hierfür besonders gut geeignet, da sie bereits eine Roadmap für die Materialentwicklung für ihr STEP-Projekt entwickelt hat und erste Reduced-Activation Ferritic-Martensitic (RAFM) Stähle im industriellen Pilotmaßstab produziert hat. Die Forschung an Proben in bestehenden Neutronenquellen sollte zudem so schnell wie möglich beschleunigt werden. Schließlich sollte auch die Möglichkeit eines Verfahrens geprüft werden, bei dem Material aus den ersten Pilotkraftwerken nach der Bestrahlung untersucht wird, um die Dauerhaftigkeit der Materialien neu zu bewerten und anschließend die Betriebszeiten zu verlängern.

Vorschlag 23:

Intensivierung der internationalen Kooperation für die Entwicklung und Qualifizierung fusionsrelevanter Materialien

Fusionsrelevante Materialien sollten in Gruppen eingeteilt werden und dann für jede Gruppe, wo notwendig, geeignete Kooperationspartner für die Entwicklung und Qualifizierung dieser Materialien ausgewählt werden, um dann in entsprechende Kooperationen einzutreten.

Vorschlag 24:

Priorisierung der Forschung in bestehenden Neutronenquellen im Hinblick auf fusionsrelevante Materialien

Die Forschung in bestehenden Neutronenquellen sollte für fusionsrelevante Materialien priorisiert werden.

Vorschlag 25:

Zulassung von Material Qualifikationen im First-of-a-Kind Reaktor

Materialien sollten in einem FOAK Reaktor getestet und qualifiziert werden können, indem nach definierten Zeiträumen Proben entnommen und untersucht werden. Im Anschluss kann die Nutzungsdauer der Materialien auf Basis der Ergebnisse angepasst werden.

Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Materialqualifikation nicht Voraussetzung für Genehmigungen ist, sondern dass Genehmigungen auf Basis existierender Forschungs- und Testergebnisse mit ggfs. beschränkter Laufzeit erteilt werden und dann später auf Basis von Material-Untersuchungen im Fusionskraftwerk ggfs. Laufzeitverlängerungen diskutiert und dann genehmigt werden können. Ansonsten wird sich die Zeitskala zu einem Kraftwerk um viele Jahre verlängern.

Magnettechnologien

HOCHTEMPERATURSUPRALEITER

Bisherige Fusionsforschungsanlagen wie W7-X, JT-60SA, ITER verwenden Tieftemperatursupraleiter (Low Temperature Superconductor, LTS), die mit ausgereiften Herstellungsverfahren industriell in Serie gefertigt werden. Für

zukünftige Fusionskraftwerke sollten dagegen modernste Leitermaterialien, sog. Hochtemperatursupraleiter (High Temperature Superconductor, HTS), zum Einsatz kommen. Dadurch werden deutlich höhere Magnetfelder ermöglicht, was eine kompaktere Bauform und einen effizienteren Betrieb erlaubt. Der HTS-Leiter wird damit zum Schlüsselmaterial für den Bau von marktwirtschaftlich wettbewerbsfähigen Magnetfusionskraftwerken.

Weltweit gibt es nur wenige Firmen, die die Herstellungsverfahren für diese HTS Leitern beherrschen. Zudem sind diese vorwiegend in Asien angesiedelt, wenn es auch mit der deutschen Firma Theva Dünnschichttechnik immerhin einen etablierten Hersteller in Europa gibt. Aber nicht alle Firmen können derzeit die für Fusionsanlagen benötigte Qualität liefern und keine davon kann den Bedarf für die bereits jetzt geplanten industriellen Demonstrationsanlagen decken.

Für einen industriellen Einsatz der HTS Technologie ist daher noch Entwicklungsbedarf gegeben, für den erhöhte Forschungsfördermittel bereitgestellt werden sollten. Das KIT, mit eigener Leiterfertigung unter Laborbedingungen, ist hier beispielsweise ein geeigneter Forschungspartner.

Da aber jedes Kraftwerk auf Basis der Magnetfusion immense Mengen solcher Leiter benötigt, und um hier zukünftige Abhängigkeiten von asiatischen Herstellern zu vermeiden, sollte dieses Up-scaling in Deutschland auch politisch unterstützt werden. Insbesondere erfordert neben der Optimierung des HTS Tapes die Etablierung der Fertigung auf Großserienproduktion staatliche Absicherung, um die Industrie zu einem zügigen Kapazitätsausbau zu befähigen. Neben der Verwendung in der Magnetfusion wird durch die Großserienfertigung eine relevante Reduktion der Kosten für HTS Tapes erreicht, sodass ein wirtschaftlicher Einsatz in anderen Technologiefeldern, wie der Energieübertragung, durch die Fusion als Ankerkunde ermöglicht wird.

Vorschlag 26:
Förderung einer großtechnischen HTS Leiterproduktion in Deutschland

Eine staatliche Förderung zur Vorbereitung eines massiven Up-scalings der Produktion von HTS Leitern sollte so schnell wie möglich initiiert werden, um internationale Abhängigkeiten zu vermeiden und eine leistungsfähige Industrie in Deutschland aufzubauen.

SPULENFERTIGUNG

Für den Bau einer Fusionsanlage müssen dann Spulen mit entwickelter HTS Technologie auch gefertigt werden, und zwar in einer industriellen Serienfertigung mit der notwendigen Rate und Qualität. Aus der Verwendung der HTS Leiter folgen allerdings eine Reihe von neuen Herausforderungen für Design und Bau der Magnetspulen gegenüber den ausgearbeiteten und erprobten Lösungen bisheriger LTS Spulendesigns, die nicht ohne weiteres übertragen werden können. Die neuen Leiter bestehen nicht nur aus einem anderen Material, sie sind auch anders geformt und zeigen eine Richtungsabhängigkeit und ein anderes Verhalten im Störfall (dem sog. Quench). Außerdem haben die höheren Magnetfelder auch deutlich höhere Kräfte zwischen den Magneten zur Folge, die beherrscht werden müssen.

Damit ist offensichtlich, dass bisherige Magnetdesigns und Fertigungsverfahren signifikant angepasst werden müssen, wobei die Herausforderungen bei den dreidimensionalen Spulen für einen Stellarator ungleich höher sind als bei planaren Tokamak-Spulen.

Zudem sind geeignete Testkapazitäten notwendig, um die Qualität dieser Spulen, die nach Einbau kaum noch zu reparieren sind, sicherzustellen. Dank einiger Großforschungsprojekte in der Fusion (W7-X, ITER, JT-60SA) und Teilchenphysik (LHC, FAIR) liegen hierzu in der deutschen und europäischen Industrie (z.B. ASG, Bilfinger, GE-Alstom, Tesla Engineering) Erfahrungswerte für die Serienfertigung supraleitender Spulen mit vergleichbarer Fertigungskapazität vor. Fertigungsraten, wie sie für spätere Kraftwerke benötigt werden, wurden hier ebenfalls bereits erreicht. Und für Wendelstein wurden alle 70 Magnetspulen in eigens errichteten Testanlagen vollständig auf ihre Stromtragfähigkeit im supraleitenden Zustand und ihre Isolationsfestigkeit getestet.

Die Schaffung der Fertigungsinfrastruktur in der Industrie sowie einer Testinfrastruktur bedeutet aber einen deutlichen Investitionsbedarf. Für die terminliche Planung muss außerdem berücksichtigt werden, dass eine derartige Serienfertigung eine Anlauf- oder Lernphase hat, bevor man den Serienoutput erreicht. Auch hierzu liegen Erfahrungswerte in der Industrie vor.

Bei einem Magnetfusionskraftwerk werden die supraleitenden Magnete einen wesentlichen Teil der Investitionssumme benötigen. Sollte es gelingen, hier geeignete Produktions- und Testkapazitäten für Prototypen und Serienproduktion in Deutschland

aufzubauen, würde ein wichtiger Teil der Wertschöpfung beim Bau von Kraftwerken auf Basis der Magnetfusion in Deutschland verortet und – bei gegebenen Exportmöglichkeiten – auch langfristig in Deutschland erbracht werden.

Pro-Fusion schlägt daher vor, einen zentralen Industriepark zur Magnetherstellung in Deutschland aufzubauen, z.B. durch Umwandlung bestehender Industrieanlagen, in dem sich interessierte Firmen bei Bedarf ansiedeln oder Produktionsflächen anmieten können. Dieser Vorschlag basiert auf der Erfahrung aus dem Wendelstein 7-X Projekt, welches sogar für die 3-dimensionalen Spulenformen eines Stellarators erfolgreich zeigen konnte, dass Spulen modular gefertigt werden können.

Modulare Fertigung für einen Roll-Out von Fusionskraftwerken bedeutet im Umkehrschluss, dass Spulen an einem zentralen Ort gebaut werden können und somit die Fertigung optimiert werden kann.

Aufgrund der Maße und des Gewichts supraleitender Spulen für Kernfusionsreaktoren (mehrere 100 t) muss ein solcher Industriepark große Hallen mit entsprechenden Krankapazitäten sowie einen Verladehafen aufweisen. Eine Lage an einem großen Fluss ist unumgänglich, um die Spulen verschiffen zu können. Standorte, die auch eine Eignung für den Bau des ersten Kraftwerks aufweisen, würden sich für diesen Vorschlag besonders gut eignen.

Vorschlag 27:
Aufbau eines Industrieparks zur Fusionsmagnetherstellung

Zur Herstellung der sehr großen und schweren Fusionsmagnete sollte ein Industriepark in unmittelbarer Nähe zu einer Wasserstraße aufgebaut werden, in dem sich interessierte Firmen bei Bedarf ansiedeln oder Produktionsflächen anmieten können.

Eine solche Infrastruktur würde die Einstiegshürden in die Fusionsmagnetproduktion deutlich senken und würde eine frühzeitige Vorbereitung auf die Prototypen- und Serienproduktion ermöglichen. Im internationalen Wettbewerb könnten so Fertigungsaufträge nach Deutschland gehen. Dadurch könnten wesentliche Wertschöpfungsanteile am Produktionsstandort Deutschland erbracht werden.

Und da es derzeit keine verfügbare Testanlage gibt, die Spulen ab etwa 6 m Durchmesser testen kann, schlägt Pro-Fusion zudem vor, an einem solchen Produktionsstandort auch eine universelle Testanlage zur Testung von Prototypen und für Qualitätstests von Serienspulen aufzubauen. Diese sollte unter industrieller Leitung und Einbeziehung des Know Hows der Forschungsinstitute bzgl. Konzeption und Testdurchführung schnellstmöglich errichtet werden. Sie könnte dann auch Spulentests als Dienstleistung für interessierte Player anbieten. Eine solche Testanlage müsste u.a. eine flexible Versorgung mit tiefkalten Gasen, Strom für supraleitende Spulen und entsprechende Schutzsysteme vorsehen. Wünschenswert wäre zudem die Möglichkeit, zusätzlich ein Fremdfeld zumindest am Ort des höchstbelasteten Leiters der zu testenden Spulen erzeugen zu können.

Vorschlag 28:
Aufbau einer Spulentestanlage für Fusionsmagnete

Am Industriepark zur Magnetherstellung sollte schnellstmöglich auch eine universelle Spulentestanlage unter industrieller Leitung, aber unter Einbeziehung des Know Hows der Forschungsinstitute (Konzeption und Testdurchführung) aufgebaut werden.

Lasertechnologien

Deutschland verfügt über eine der leistungsfähigsten Optikindustrien der Welt. Allerdings findet ein Großteil der Produktion aktuell im Ausland statt. Der Bedarf der Laserfusion eröffnet hier eine Chance, dies zu ändern, denn er erfordert den massiven Aufbau der Kapazitäten in einer stark zukunftsfähigen Industrie, mit positiven Effekten für die Entwicklung einer deutschen Wertschöpfungskette. Diesen Vorsprung zu halten und auszubauen erfordert Investitionen, die durch die Fusion ermöglicht werden.

Neben der Förderung der eigentlichen Laserquellen sollte sich die staatliche Unterstützung in Form von Finanzierungen oder Absicherungen insbesondere auf folgende Themengebiete fokussieren:

- **Laserdioden:** Der Hauptteil der Investitionskosten in einem Laserfusionskraftwerk wird durch die Beschaffung von Laserdioden zum Pumpen des Lasermaterials verursacht. Um diese

Wertschöpfungskette zu schließen, muss in die Produktion von Laserdioden in Europa investiert werden. Aktuell produzieren TRUMPF und LEONARDO in den USA, OSRAM in Deutschland.

- **Laserglas:** Wird aktuell nur in den USA und China produziert.
- **Nichtlineare Kristalle:** Die Umwandlung des Laserlichts in den UV-Bereich erfordert den Einsatz nichtlinearer Kristalle. Diese werden für große Strahldurchmesser benötigt. Die Verfahren zur Zucht der Kristalle und die Produktionskapazitäten müssen aufgebaut werden.
- **Hochleistungsoptiken:** In einem Laserfusionskraftwerk werden mehrere tausend Hochleistungsoptiken mit großen Aperturen benötigt. Die Optiken werden mit hoher Intensität und hoher Repetitionsrate belastet. Die dielektrischen Beschichtungen und die Kühlung der Optiken müssen Pulszahlen von einigen Milliarden Pulsen ohne Schäden vertragen. Solche Optiken müssen entwickelt und dafür geeignete Testanlagen vorgesehen werden.
- **Großskalige Kompressionsgitter:** Sie sind eine Schlüsselkomponente der Lasersysteme zur zeitlichen Verdichtung der Pulse auf fusionsrelevante Leistungsdichten. Die Gitter müssen sehr große Aperturen, höchste Beugungseffizienzen sowie eine exzellente Strahlqualität bei gleichzeitig hoher Pulsenergie und hoher Wiederholrate gewährleisten. Dabei sind sie extremen thermischen, mechanischen und optischen Belastungen ausgesetzt. Die Gitterstrukturen, Substrate und Beschichtungen müssen eine hohe Langzeitstabilität über Milliarden von Pulsen ohne Degradation, Verformung oder Effizienzverlust aufweisen.
- **Hochpräzise zeitliche Synchronisation und Strahlrichtungsstabilität aller Laserkanäle:** Sie sind von zentraler Bedeutung für die effiziente Zündung der Fusion. Bei einer großen Anzahl gleichzeitig eingesetzter Laserstrahlen müssen Timing-Abweichungen im Bereich von Piko- bis Femtosekunden sowie Winkel und Positionsabweichungen im Mikro- bis Submikroradiant-Bereich beherrscht werden, um eine symmetrische Energie-Einkopplung in das Target sicherzustellen. Diese Anforderungen gelten insbesondere bei hohen Repetitionsraten im Dauerbetrieb eines Kraftwerks.

Mechanische, thermische und optische Drift, Vibrationen sowie Strahlungs- und Alterungseffekte dürfen die Synchronisation und Ausrichtung nicht beeinträchtigen. Erforderlich sind daher stabile, robuste und aktiv geregelte Konzepte für Timing-Verteilung, Strahlausrichtung und Feedback-Systeme.

- **Finale Optik:** In einem Laserfusionskraftwerk stellt die finale Optik die letzte optische Schnittstelle zwischen dem Lasersystem und der Reaktionskammer dar und ist damit einer außergewöhnlich hohen Belastung ausgesetzt. Sie muss die Laserstrahlen mit höchster Präzision auf das Target fokussieren und ist gleichzeitig direkt Neutronenstrahlung, Gammastrahlung, Plasmaemissionen sowie Partikel und Debrisbelastungen ausgesetzt. Die Materialien, Beschichtungen und Schutzkonzepte der finalen Optik müssen daher nicht nur extremen optischen Intensitäten und hohen Wiederholraten standhalten, sondern auch Strahlenschäden, Kontamination und langfristige Degradation über Milliarden von Pulsen hinweg minimieren. Gleichzeitig sind Austauschbarkeit, Ausrichtung und zukünftige Wartbarkeit zentrale Designanforderungen für den Kraftwerksbetrieb.
- **Targets:** Die derzeit in der Laserfusion eingesetzten kryogenen DT-Targets stellen weiterhin erhebliche physikalische und wirtschaftliche Herausforderungen dar. Ihre Herstellung erfordert Temperaturen von etwa 18 K in den wenige Millimeter großen Hohlkugeln. Diese extremen Bedingungen sind notwendig, um auf der Innenwand des Targets eine homogene DT-Eisschicht zu erzeugen (sog. β -Layering). Die strengen Qualitätsanforderungen an diese sehr dünnen Eisschichten treiben die Produktionskosten stark in die Höhe und erschweren eine Skalierung zur industriellen Massenfertigung für zukünftige Fusionskraftwerke. Aktuelle Forschungsarbeiten befassen sich daher mit Alternativen, die das zeitaufwändige β -Layering vermeiden. Ein Ansatz sind sog. wetted foams, bei denen verflüssigtes DT in eine dünne, schwammartige Polymerstruktur auf der Innenseite des Targets eingebracht wird. Dies vereinfacht die Herstellung der Brennstoffschicht erheblich. Allerdings bringen die eingebrachten Polymerreste zusätzliche, nicht fusionierbare Verunreinigungen in den Brennstoff ein, die die Zündung erschweren oder verhindern können.

Vorschlag 29:
Aufbau einer Produktionskapazität für Laserdioden in Deutschland

In Deutschland sollte eine Produktionskapazität für Laserdioden aufgebaut werden, die auch die Ausgangsstoffe (Halbleiterindustrie) und Nachbearbeitung (Passivieren, Stack-Fertigung, Kühlung, Leistungselektronik) umfassen sollte. Es muss ein standardisiertes Diode-Stack-Design geschaffen werden, um den Aufbau kosteneffizienter Produktionsanlagen zu ermöglichen und die zukünftige Service- und Wartbarkeit der Dioden zu garantieren. Die hierzu notwendigen Investitionen sollten staatlich abgesichert werden.

Vorschlag 30:
Förderung der großtechnischen Produktion von Laserglas

Um internationale Abhängigkeiten zu minimieren und die Produktion auf ein für den Bau eines Fusionskraftwerks notwendiges Niveau zu heben, sollten industrielle Kapazitäten geschaffen werden. Die hierzu notwendigen Investitionen sollten staatlich abgesichert werden.

Vorschlag 31:
Entwicklung von Kristallen zur Frequenzkonversion mit großer Apertur

In Deutschland sollte eine Produktionskapazität für nicht-lineare Kristalle zur Umwandlung des Laserlichts in den UV-Bereich aufgebaut werden. Die hierzu notwendigen Investitionen sollten staatlich gefördert werden.

Vorschlag 32:
Förderung der Entwicklung von Hochleistungsoptiken

Der Staat sollte die Entwicklung von Hochleistungsoptiken für die Laserfusion einschließlich entsprechender Testanlagen fördern.

Vorschlag 33:
Förderung der Entwicklung von Hochleistungs-Kompressionsgittern

Der Staat sollte die Entwicklung fusionspezifischer Kompressionsgitter fördern, einschließlich dem Aufbau geeigneter Test- und Qualifikationsinfrastrukturen, um ihre Einsatzfähigkeit unter reaktorähnlichen Bedingungen nachzuweisen.

Vorschlag 34:
Förderung der Entwicklung von Synchronisation und Pointing Stability der Laserkanäle

Der Staat sollte die Entwicklung stabiler, robuster und aktiv geregelter Konzepte für Timing-Verteilung, Strahlausrichtung und Feedback-Systeme fördern.

Vorschlag 35:
Förderung der Entwicklung von finalen Optiken

Der Staat sollte die Entwicklung robuster finaler Optiken fördern, einschließlich Schutz und Debris-Mitigationskonzepten, sowie den Aufbau geeigneter Test und Qualifikationsinfrastrukturen, die reaktorähnliche Bedingungen ermöglichen.

Vorschlag 36:
Förderung von Alternativen zu DT-Eis

Der Staat sollte die gezielte Entwicklung von Alternativen zu DT-Eis weiter voranzutreiben. Dazu gehören systematische Untersuchungen der Kompressionseigenschaften und Zündbedingungen sowie geeigneter Herstellungsverfahren für alternative Brennstoffe. Diese Optionen müssen sowohl hinsichtlich ihres Einsatzes im späteren Kraftwerksbetrieb als auch ihres Einflusses auf den gesamten Brennstoffkreislauf bewertet werden.

Tritium Brütung und Brennstoffkreislauf

Da die Deuterium-Tritium-Fusion im Vergleich zu anderen Brennstoffen die geringsten technischen Hürden aufweist, besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass die ersten Fusionskraftwerke mit Deuterium-Tritium als Brennstoff betrieben werden. Die Auslegung des Tritium-Brennstoffkreislaufs ist daher ein entscheidender Aspekt in der Systementwicklung zukünftiger Fusionskraftwerke. Sie ist eng verknüpft mit den Themen Verarbeitung, Isotopentrennung, Sicherheit, Materialverhalten und Brennstoffmanagement und muss an die spezifischen Betriebsbedingungen des jeweiligen Fusionstyps angepasst werden.

Grundsätzlich benötigen alle Fusionskraftwerkskonzepte – unabhängig von der Technologie – eine Tritiumproduktion von etwa 150g/(GW Fusionsleistung) pro Tag, um einen stationären Betrieb sicherzustellen. Diese Menge muss in speziellen Blanketmodulen an der die Neutronen aufnehmenden Wand der Reaktionskammer erbrütet und dann der Fusionsreaktion zugeführt werden, wozu ein technisch aufwendiger, kontinuierlich betriebener Tritiumbrennstoffkreislauf notwendig ist.

Bei der Magnetfusion liegt der Anteil des verbrannten Tritiums im Vergleich zur Menge des eingespeisten Tritiums (Burn-up-Rate) typischerweise zwischen 1–3 %, während er bei der Laserfusion über 30 % erreichen kann. Dadurch ist der notwendige Tritiumdurchsatz im Brennstoffkreislauf bei der Laserfusion um etwa eine Größenordnung geringer, was einen einfacheren und kompakteren Aufbau der Prozesskette ermöglicht.

Bei der Konzeption von Kraftwerken auf Basis der Magnetfusion kann eine bessere Wirtschaftlichkeit erzielt werden, indem man entweder bei gleicher Abbrandrate die Größe des Kraftwerks erhöht oder eine Erhöhung der Abbrandrate durch eine effizientere Einspeisung von Tritium-Pellets in das Plasma erreicht. Bei der Laserfusion müssen dagegen noch grundlegende Probleme bei der Skalierung hin zu reaktorwirtschaftlichen Bedingungen überwunden werden. Denn Pelletgrößen lassen sich nicht beliebig skalieren, wenn sie sich Aufprallenergien nähern, die bei jedem Pellet mehreren Tonnen TNT entsprechen.

Zudem müssen grundlegende Präzisionsprobleme bei den geforderten, hohen Wiederholraten von 10 Hz (von derzeit 1 Schuss alle paar Wochen)

gelöst werden. Allerdings benötigt die Laserfusion wahrscheinlich keine Puffergase wie die Magnetfusion; ihre Targets bestehen neben dem eigentlichen Brennstoff aus Strukturmaterialien (z.B. Diamant oder Kohlenwasserstoffverbindungen) und gegebenenfalls weiteren Elementen. Die Fähigkeit, Tritium effizient von diesen Verunreinigungen zu trennen und zurückzugewinnen, ist entscheidend für einen wirtschaftlichen Betrieb und muss je nach Prozess und Konzept optimiert werden.

Das Erbrüten von Tritium aus Lithium in einem Fusionsreaktor und dessen Verarbeitung im Brennstoffkreislauf muss als ein notwendiger Erfolgsfaktor sowohl für Laser- als auch für die Magnet-Fusion angesehen werden. Weitsichtigerweise wurde dazu insbesondere im Tritiumlabor für Tritiumverarbeitung am KIT bereits viel vorbereitende Forschung betrieben. Es wäre wünschenswert, diesen Wissensvorsprung in einen Wettbewerbsvorteil für Deutschland zu übersetzen.

Dazu schlägt Pro-Fusion den Aufbau einer Tritium-Testinfrastruktur vor. Mit ihr könnten dann auch Verfahren erarbeitet werden, um den Brennstoffkreislauf gezielt an ein Plasmakonzept anzupassen, um maximale Effizienz und Sicherheit zu erreichen. Einzelne Komponenten und Prozesse können mit plasma-agnostischen Methoden entwickelt und getestet werden – die Systemintegration erfordert jedoch eine spezifische Optimierung für das jeweilige Fusionskonzept auf der Basis einer integrierten Testanlage.

Vorschlag 37:

Aufbau einer Infrastruktur zur Entwicklung und Testung des Tritium-Brennstoffkreislaufes

In Deutschland sollte eine dedizierte Infrastruktur zur Entwicklung und Testung des Tritium-Brennstoffkreislaufes unter industrieller Führung, aber mit Beteiligung der Forschung aufgebaut werden. In einem weiteren Schritt sollten Brutversuche zuerst an einer existierenden Neutronenquelle (Reaktor oder Spallation) und später an einer für diesen Zweck zu optimierenden, dedizierten Quelle durchgeführt werden.

Abfallmanagement

Die Realisierung von Fusionsanlagen in Deutschland erfordert ein integriertes Konzept für Strahlenschutz und Abfallmanagement, das sich auf bewährte Technologien aus der Abfallbehandlung kerntechnischer Anlagen stützt. Grundvoraussetzung ist hier eine klare regulatorische Vorgabe und Festlegung von Verantwortlichkeiten. Die Deutsche Industrie ist gut aufgestellt für diese Aufgabe. Es kann auf existierende Technologien und Expertise zurückgegriffen werden. Dabei muss aber ein Aufwand in der Anpassungsentwicklung geleistet und auch zeitlich mit eingeplant werden.

Darüber hinaus darf Deutschland nicht noch einmal den Fehler machen, die Behandlung der Abfälle und den Umgang damit in die Zukunft zu verschieben, sondern die Konzepte dazu müssen von Anfang an Teil der deutschen Fusionsstrategie sein.

Vorschlag 38:
Transparente Klärung des Umgangs mit Abfällen

Von Anfang an sollte die Behandlung und Entsorgung von Abfällen, die bei der Kernfusion entstehen, transparent und unter Einbindung der Öffentlichkeit diskutiert werden.

Technologie Deep Dives

Weitere, sehr viel detailliertere Handlungsempfehlungen für die technologische Agenda ('Technologie Deep Dive') betreffen die unterschiedlichen Technologieentwicklungen, die auf dem Weg zu einem Fusionskraftwerk noch durchlaufen werden müssen. Hierzu orientiert sich Pro-Fusion an der Systematik der Technology Readiness Levels, wie sie in Abbildung 1 angegeben sind. Vorschlag 39 enthält dann detaillierte Handlungsempfehlungen für Technologieentwicklungen für die Magnet- und Laserfusion. Diese detaillierten Handlungsempfehlungen sind als vorläufig zu betrachten und bedürfen weiterer Diskussionen zum Zwecke der Konsolidierung and Harmonisierung.

Um die Konsistenz von Maßnahmen mit den zeitlichen und technischen Bedürfnissen der Start-ups im Verband prüfen zu können, wird Pro-Fusion für die Start-ups jeweils eine Roadmap (oder Timeline) online zur Verfügung stellen. Diese sind unter den folgenden QR Codes direkt abrufbar.

	TRL	
Betrieb	9	Die volle Funktionsfähigkeit des System als Träger der Technologie ist unter operationellen Einsatzbedingungen nachgewiesen.
	8	Das System als Träger der Technologie ist vollständig entwickelt und qualifiziert.
	7	Die volle Funktionsfähigkeit des System-Prototypen als Träger der Technologie ist unter operationellen Einsatzbedingungen nachgewiesen.
Entwicklung	6	Die Technologie funktioniert als Teil eines System-Prototypen unter relevanten Einsatzbedingungen.
	5	Die Technologie erfüllt vorab festgelegte Kriterien, was unter relevanten Einsatzbedingungen nachgewiesen ist.
	4	Die Technologie erfüllt vorab festgelegte Kriterien, was unter Laborbedingungen nachgewiesen ist.
Forschung	3	Die prinzipielle Machbarkeit der Technologie ist experimentell nachgewiesen.
	2	Das Technologiekonzept ist detailliert ausformuliert.
	1	Grundlegende Technologie-Prinzipien sind beobachtet und beschrieben.

Abbildung 1: Definition Technologie-Reifegrad (Technology Readiness Level TRL)

Vorschlag 39:
Technologieentwicklungen für die Magnet- und Laserfusion

#	System / Subsystem	Fusion Type	TRL (now → Alpha)	Rationale
01	Non-planar high-field HTS coil sector (full sector)	Magnet	5 → 8	Full-sector manufacture & cryo integration to be demonstrated on Alpha
02	HTS conductor (tape / cable)	Magnet	5 → 8	Long-length conductor & joints validated by Alpha builds
03	Coil joint technology (HTS joints)	Magnet	4 → 7	Joints matured under cryo & EM loads on Alpha
04	Coil feeders, busbars & current leads	Magnet	4 → 7	Complex routing & high-current joints in non-planar geometry validated
05	Magnet power supplies & DC control (plant-grade)	Magnet	5 → 8	Power electronics and control validated at device scale
06	Quench detection & protection for HTS coils	Magnet	4 → 7	HTS quench detection/protection proven under realistic loads
07	Cryogenic plant for HTS coils	Magnet	5 → 8	Cryo systems mature; Alpha validates integrated operation with sectors
08	Magnet structural support & pre-load systems	Magnet	4 → 7	Full-scale structural validation under EM loads & cryo conditions
09	Magnet metrology & alignment systems	Magnet	5 → 8	High-precision assembly & post-cooldown alignment validated
10	Magnet thermal & mechanical health monitoring	Magnet	4 → 7	Real-time sensing and analytics validated under operations
11	Splittable-sector interface hardware (mechanical & vacuum seals)	Magnet	4 → 7	Vacuum reclosure & mechanical repeatability demonstrated on Alpha
12	Sector assembly tooling & jigs (plant scale)	Magnet	3 → 7	Production tooling matured via pilot assemblies
13	Precision metrology & alignment workflows	Magnet	4 → 8	Reproducible sector alignment procedures validated end-to-end
14	Cryogenic structural interfaces (thermal isolation & supports)	Magnet	4 → 7	Thermal-structural interactions validated at scale
15	Full-scale support structure (gravity supports / base)	Magnet	4 → 7	Structural system validated under combined loads & fatigue
16	Remote maintenance tooling & casks (sector extraction)	Magnet	4 → 7	Robotic workflows validated for sector extraction & PFC replacement
17	Robotic end-effectors for plasma-facing components (PFCs) replacement	Magnet	4 → 7	Precision handling and remote servicing validated
18	Sector transport & assembly vehicles (plant logistics)	Magnet	3 → 6	Logistics & heavy lifts proven with full sector mass
19	Vacuum vessel sectorization & seals	Magnet / Laser	5 → 8	Sectorized vessel reclosure and leak rates qualified
20	Welding, flange & bellows systems for sector reclosure	Magnet / Laser	5 → 8	Repeated vacuum reclosure by production methods
21	Main vacuum pumping (dry turbopumps / roots / boosters)	Magnet / Laser	6 → 8	Mature industrial tech; device-scale throughput validated
22	Divertor / edge pumping & cryopumps	Magnet / Laser	4 → 7	Improved net pumping via partially closed divertor demonstrated
23	Neutral gas handling, bake & leak detection systems	Magnet / Laser	5 → 7	Plant-like gas handling validated (valves, bakes)
24	Tritium processing skid (demonstrator grade)	Magnet / Laser	3 → 6	Simplified tritium processing validated in situ
25	Tritium accounting & inventory measurement systems	Magnet / Laser	3 → 6	Operational tritium accounting demonstrated
26	Partially-closed divertor cassette design	Magnet	4 → 7	Demonstrate detachment & pumping improvements compatible with dense QI plasmas

27	Fully closed divertor concept (upgrade validation)	Magnet	2 → 5	Upgrade path allows first experimental validation of fully closed designs
28	Divertor target armor (tungsten monoblocks)	Magnet	5 → 7	Armor behavior under integrated loads validated
29	Divertor cooling channels & attachment hardware	Magnet	4 → 7	Cooling hydraulics and attachments validated under cyclic loads
30	First-wall panels & blanket interface (plasma-facing components (PFCs))	Magnet / Laser	4 → 7	Integrated PFC performance in radiative + particle environment validated
31	Armor attachment & replacement interfaces	Magnet / Laser	4 → 7	Maintainability & repeat replacement validated
32	PFC microstructure solutions (coatings, micro-channels)	Magnet / Laser	3 → 6	Micro-structure options tested under realistic fluxes
33	PFC cooling loop & heat-extraction interface (demo scale)	Magnet / Laser	4 → 6	PFC cooling and heat extraction engineering validated
34	Erosion and erosion-transport diagnostics	Magnet / Laser	5 → 8	Diagnostics validated under device conditions and cross-checked vs post-mortem
35	Tungsten inventory controls (traps / getters / filters)	Magnet / Laser	3 → 6	Source, transport & screening behaviour quantified
36	240 GHz high-power gyrotron sources (single units)	Magnet	4 → 7	High-frequency gyrotrons with uptime & beam quality validated
37	Gyrotron power supplies & modulators	Magnet	4 → 7	Reliability & faults handling validated in integrated system
38	ECRH transmission lines & corrugated vacuum waveguides (240 GHz)	Magnet	5 → 8	240 GHz transmission validated in-place with acceptable losses
39	ECRH launchers & steerers (mirrors / launchers)	Magnet	4 → 7	Steering accuracy and survival under plasma loads validated
40	RF window technology (millimeter-wave windows)	Magnet	4 → 7	High-power window survivability & lifetime tested
41	Additional auxiliary heating integration (X1)	Magnet	3 → 6	Additional heaters integrated and tested for interactions
42	Heating real-time control & deposition steering	Magnet	5 → 8	Deposition control for profile shaping validated
43	High-power RF diagnostics & stray-power protection	Magnet	4 → 7	Protection & interlocks validated for stray power and faults
44	Pellet injector hardware (launchers)	Magnet	5 → 7	Pellet penetration & repeatable core deposition in QI geometry
45	Pellet ablation modeling & deposition diagnostics	Magnet	4 → 7	Ablation & deposition models validated against experiment
46	Pellet launcher integration (ports & alignment)	Magnet	4 → 7	Port interfaces & reliable alignment validated in ops
47	Tritium storage & transfer hardware (demo scale)	Magnet / Laser	3 → 6	Safe tritium transfer & storage validated under operations
48	Tritium monitoring & leak detection (plant-grade sensors)	Magnet / Laser	4 → 7	Detection & alarm chain validated during tritium ops
49	Tritium cleanup & isotope separation (demo loops)	Magnet / Laser	2 → 5	Simplified cleanup loops tested with surrogate & tritium
50	Gas puffing, fueling valves & sequencers	Magnet / Laser	5 → 7	Valve lifetime & dosing accuracy validated under high cycles
51	Tritium glovebox & maintenance staging systems	Magnet / Laser	3 → 6	Maintenance staging & containment validated for tritium work
52	Diagnostics hardening & plant-grade readiness	Magnet / Laser	5 → 8	Consolidated program to harden diagnostics, ensure redundancy, maintainability and calibration for plant operations
53	Gamma & activation diagnostics	Magnet / Laser	5 → 8	Gamma spectroscopy & activation diagnostics hardened and calibrated for shielding / activation modeling
54	Real-time plasma control platform (HW + RT OS)	Magnet	6 → 8	Deterministic, low-latency control hardware/OS validated with device actuators
55	Model predictive control (MPC) & profile controllers	Magnet	5 → 8	MPC demonstrated for profile shaping and burn control
56	Alfvén eigenmodes (AEs) detection & suppression algorithms	Magnet	4 → 7	AE detection & suppression validated under Alpha fast-ion regimes

57	Integrated modeling chain (equilibrium → transport → heating)	Magnet	5 → 8	Cross-validated integrated predictions for plant extrapolation
58	Predictive gyrokinetic suites (validation)	Magnet	5 → 7	Turbulence models validated in low- ρ^* / high- β regimes
59	High-bandwidth telemetry & storage systems	Magnet	6 → 8	Device-scale telemetry & storage validated for continuous diagnostics
60	Radiological protection systems (monitoring & interlocks)	Magnet / Laser	5 → 8	Dosimetry, interlocks & protection chains validated in tritium ops
61	Cryogenic target technology	Laser	3 → 8	Target filling and insertion, mass fabrication of fusion targets
62	Broadband laser systems	Laser	3 → 8	Mitigating LPI using broadband or a series of narrowband lasers
63	Laser beam smoothing	Laser	4 → 8	Spatial incoherence, ISI
64	High repetition, diode-pumped lasers	Laser	4 → 8	Scaling existing systems to higher energy and aperture
65	High-Brightness laser diodes	Laser	6 → 8	Mass-manufacturing of laser diodes, automated stacking, quality control
66	High power el. Pulse generators	Laser	6 → 8	Efficient power supply for pulsed laser systems
67	Laser pulse shaping and steering	Laser	6 → 8	Homogeneous illumination and minimizing beam offset
68	Large optics manufacturing and coating	Laser	6 → 8	Increasing production capability and developing Gshot capability
69	Optical diagnostics for lasers and targets	Laser	6 → 8	Developing diagnostics at high repetition rate and under harsh environmental conditions
70	Simulation of laser systems	Laser	6 → 8	Predictive capability for next gen laser systems
71	Damage resistant optics	Laser	4 → 8	Final optics exposed to neutrons and plasma debris
72	Irradiation facility for first wall testing	Laser	3 → 8	Pulsed sample irradiation with x-rays and charged particles
73	Blanket transport and assembly vehicles	Laser	2 → 8	Logistics and lifting of blanket module
74	Target injector design and construction	Laser	4 → 8	Develop acceleration scheme, accuracy, target feeding
75	Target injector integration	Laser	3 → 8	Port, interface and target tracking
76	High-performance compression gratings	Laser	5 → 8	Improvement of surface flatness with increasing size, as well as enhancement of the laser-induced damage threshold (LIDT)
77	Synchronization and Pointing Stability	Laser	5 → 8	Compensation of timing jitter in the pico- and femtosecond range, as well as laser pointing stabilization in the microradian (μ rad) range
78	Digital Twins	Magnet / Laser	3 → 8	Holistic simulation of the fusion systems across the entire power plant
79	Final Optics	Laser	2 → 8	From the initial proof of feasibility to fully operational final optics in the power plant
80	Mass-producible targets	Laser	3 → 8	Alternatives to DT ice in order to reduce production time and costs to commercially viable levels



Proxima Fusion Timeline



Focused Energy Timeline



Marvel Fusion Timeline

Das Positionspapier des Industrieverbands Pro-Fusion e.V. ist urheberrechtlich und leistungsschutzrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die Nutzung, Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Zugänglichmachung sowie die Entnahme und Speicherung von Inhalten, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung oder sonstige Nutzung der Inhalte, auch von einzelnen Teilen, ist im Einzelfall nur im Rahmen der Bestimmungen des deutschen Urheberrechtsgesetzes in der jeweils geltenden Fassung zulässig.

Impressum

Industrieverband
Pro-Fusion e.V.
Zietenstr. 21A
12249 Berlin
Deutschland

Vertreten durch den Vorstand:

Dr. Hans-Henrich Altfeld, Prof. Dr. Maximilian Fleischer,
Dr. Saskia Horsch, Markus Kind, Günter Kraft,
Armin Reinartz, Dr. Ulf Thiele, Dr. Wolfgang Walter

Lobbyregisternummer:
R007371

Kontakt:
info@pro-fusion.org
+49176 5764 7710
www.pro-fusion.org

www.pro-fusion.org