

Übersichtsstudie Kernfusion für den Klimabeirat Hessen

Darmstadt, 15.11.2024

Autorinnen und Autoren

Dr. Matthias Englert
Öko-Institut e.V.

Dr. Anna Kopp
Öko-Institut e.V.

Kontakt

info@oeko.de
www.oeko.de

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Borkumstraße 2
13189 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund	4
2	Sachstand	4
2.1	Technologischer Stand von Kernfusionsanlagen	4
2.1.1	Technologie-Reifegrad (TRL)	6
2.1.2	Offene Forschungs- und Entwicklungsfragen von Kernfusionskraftwerkskonzepten	8
2.1.3	Abschätzungen zu Zeitbedarf und Kosten der Entwicklung von Kernfusionskraftwerken	13
2.2	Entsorgung der radioaktiven Abfälle	16
2.3	Nichtverbreitungsaspekte	17
2.3.1	Potential zur Spaltmaterialproduktion	17
2.3.2	Einsatz von Tritium	18
2.3.3	Potential zur vertikalen Proliferation	19
2.4	Stand der Regulierung	19
2.4.1	Sicherheit	20
2.4.2	Nichtverbreitung	20
2.4.3	Entsorgung	21
2.5	Potentielle Rolle von Kernfusionskraftwerken in einem zukünftigen Stromsystem	21
	Literaturverzeichnis	24

1 Hintergrund

Weltweit gibt es seit wenigen Jahren vermehrt Investitionen im Bereich der Kernfusion als eine potentielle zukünftige CO₂-arme Energiequelle, die dazu beitragen soll, den steigenden Energiebedarf klimaneutral zu decken (BMBF 2023b; FIA 2023). Während viele Forschende, die seit Jahren oder Jahrzehnten in diesem Bereich an Universitäten und Forschungsinstituten tätig sind, davon ausgehen, dass Kernfusion bis Mitte des Jahrhunderts nicht kommerziell umsetzbar sein wird, geben vor allem neuere Start-up Firmen zum Beispiel Zeitskalen von 10-15 Jahren für die Bereitstellung von Prototypen bzw. ersten Fusionskraftwerken an (Merian 2023; Gast 28.12.2023).

In Deutschland gibt es seit vielen Jahrzehnten umfangreiche Forschungsarbeiten zur Magnetfusion. Das Interesse an laserinduzierten Verfahren, die bisher vor allem in den USA und in Frankreich aus militärischer Motivation heraus gefördert wurden, hat in den letzten Jahren zugenommen. Diese Technik wird zur Zeit in Deutschland vorrangig von privaten Firmen verfolgt (BMBF 2023b; 2024).

Dabei wird bei der Darstellung physikalischer Erfolge an Fusionsexperimenten häufig außer Acht gelassen, dass es noch weitreichende offene technologische Fragestellungen gibt und diese Experimente weit davon entfernt bzw. nicht dafür ausgelegt sind, Strom zu erzeugen (DoE 2022; BMBF 2023a; IAEA 2023).

Vor dem Hintergrund des aktuellen Koalitionsvertrages der hessischen Landesregierung benötigt der Klimabeirat der Hessischen Landesregierung Unterstützung bei einer fachlichen Stellungnahme zu Fragen der Forschung und Entwicklung von Fusionskraftwerken (Schwerpunkt: laserinduzierte Verfahren).

Der Klimabeirat Hessen beschäftigt sich dabei mit der Frage, ob bzw. bis wann die laserbasierte Kernfusion zur Erreichung des hessischen Klimaziels, bis 2045 klimaneutral zu sein, absehbar einen relevanten Beitrag leisten kann und welche Empfehlungen sich daraus ergeben.

2 Sachstand

2.1 Technologischer Stand von Kernfusionsanlagen

Weltweit gab und gibt es mehrere experimentelle Fusionsanlagen, wie JET (*Joint European Torus*) im Vereinigten Königreich (UK), Wendelstein 7-X in Deutschland und NIF (*National Ignition Facility*) in den USA. Während bei JET und Wendelstein 7-X Fusion in einem Plasma, das durch Magnetfelder in einem Torus gehalten wird, gezündet wurde bzw. werden soll, wird bei NIF auf die sogenannte Trägheitsfusion (ICF, *inertial confinement fusion*) gesetzt. Bei der ICF wird durch viele Laser Energie in eine kleine Brennstoffkapsel eingebracht. Diese implodiert und sehr kurzzeitig werden Temperaturen und Drücke erreicht, unter denen der Brennstoff in der Kapsel, meist Deuterium und Tritium, fusionieren kann.

Werden die Laser direkt von allen Seiten symmetrisch auf die Kapsel gerichtet, spricht man von *direct drive*. Bei NIF wird *indirect drive* angewandt. Die Laser werden auf die Innenseite eines die Brennstoffkapsel umgebenden kleinen Hohlraums gerichtet. Die entstehende Röntgenstrahlung überträgt dann Energie auf die Brennstoffkapsel. Das *direct drive* Verfahren ist etwa 5mal energieeffizienter als das *indirect drive* Verfahren (Ditmire et al. 2023).

Ein weiterer Ansatz ist *fast ignition*, bei dem die Zündung der Fusion in 2 Teilschritte aufgeteilt wird. In einem ersten Schritt erfolgt eine Komprimierung der Kapsel wie beim *direct drive* Verfahren. Die

eigentliche Zündung erfolgt dann in einem zweiten Schritt durch einen fokussierten Strahl aus geladenen Teilchen auf die schon komprimierte Kapsel. Als Teilchen könnten Elektronen oder Protonen verwendet werden. Als Vorteile der *fast ignition* gibt die hessische Firma Focused Energy an (Ditmire et al. 2023), dass die Trennung der Komprimierung von der Zündung es erlaube, eine höhere Masse an Targetmaterial zu verwenden und dass eine geringere Komprimierungsgeschwindigkeit der Kapsel nötig sei. Ein weiterer Vorteil bestehe durch die Möglichkeit auf eine symmetrische Komprimierung zu verzichten, wodurch die Anforderungen an die Laser und die Fertigung der Kapsel sinken würden. Die Verwendung von Protonen ist darüber hinaus technisch sehr gut verstanden und Protonen können auf ein sehr kleines Volumen fokussiert werden.

Daneben gibt es auch Forschung zur Verwendung von Schwerionen (*heavy ion ICF*) und Magnetfeldern (*magnetically driven ICF*) statt Laser.

Trägheitsfusion wurde bisher vor allem in den USA und Frankreich aus militärischer Motivation verfolgt (siehe dazu Abschnitt 2.3.3).

Bei NIF wurden seit Ende 2022 mehrfach kurzzeitig Fusionsreaktionen gezündet. Dabei rangierten die sogenannten physikalischen *Q*-Werte, das Verhältnis der Energie, die in die Reaktion gesteckt wird zur freigesetzten Energie, im Bereich von 1,3 bis 2,4 (LLNL 2024). Dabei wird allerdings nicht betrachtet, dass noch etwa 100mal mehr Energie für den Betrieb der Laser aufgebracht wurde, um die Reaktion zu ermöglichen. Insgesamt wurde also jeweils nur ein Bruchteil der anfangs aufgewandten Energie durch die Fusionsreaktion freigesetzt. Ein Nettoenergiegewinn erfordert somit eine Effizienzsteigerung um etwa 1000% (Helmholtz Task Force "Laserbasierte Fusionsforschung" 2023). Die Experimente bei NIF werden mit einer Frequenz von maximal 1 pro Tag durchgeführt. Um verlässlich Strom erzeugen zu können, müssten sie mit einer Frequenz von etwa 10 Hz, also 10 pro Sekunde laufen. Das entspricht knapp 900 000 Zündungen in 24 Stunden und damit ebenso vielen benötigten Brennstoffkapseln.

Die wissenschaftliche Mission zur Nutzung von ICF als Energiequelle konzentrierte sich bei NIF bisher auf eine robuste und wiederholbare Zündung und die Maximierung des Fusionsgewinns, nicht auf die Entwicklung eines Reaktorkonzeptes. Die Energieforschung am Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) beschränkte sich auf Studien zur Konstruktion von Reaktionskammern, Entwicklung von Lasertechnologie und eine integrierte Studie über ein Kraftwerk namens LIFE (*Laser Inertial Fusion Energy*). Das LIFE-Projekt endete 2013 und das LLNL hat sich seitdem nicht mehr direkt an Energieforschungsaktivitäten beteiligt (BMBF 2023a).

Mit den Lasern der europäischen Forschungsanlage *Extreme Light Infrastructure* (ELI) mit Standorten in der Tschechischen Republik, Ungarn und Rumänien werden Experimente zur Trägheitsfusion in Kollaboration mit Forschungsinstituten in verschiedenen Ländern sowie privaten Firmen durchgeführt (ELI ERIC 2023).

Keines der genannten Experimente, auch nicht der im Bau befindliche Fusionsreaktor ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor* oder ‚der Weg‘ aus dem Lateinischen) in Frankreich, der nach dem Magneteinschlussprinzip arbeitet, ist dafür ausgelegt, Strom zu erzeugen. Die geplanten Nachfolgeprojekte für ITER, die DEMO Reaktoren, sollen als erste Prototypen Elektrizität erzeugen, allerdings noch nicht auf industriellem Maßstab. Verschiedene Länder entwickeln hierzu verschiedene Konzepte. Der EU-Prototyp ist erst nach 2040 geplant (EUROfusion

2018). Die derzeitigen Planungen für ITER sehen eine Inbetriebnahme 2034-2036 vor. Mit ersten Tritiumexperimenten soll 2039 begonnen werden.¹

2.1.1 Technologie-Reifegrad (TRL)

Das Konzept des Technologie-Reifegrads oder TRL (*technology readiness level*) wurde in den 1970ern von der NASA entwickelt (Mankins 2009), um eine unabhängige Kennzahl zur Einschätzung der Reife von technologischen Entwicklungen zu haben. Heutzutage wird es auf verschiedene Bereiche angewandt, um abzuschätzen, wie weit eine Technologie auf dem Weg zur Marktreife ist und Vergleiche zwischen unterschiedlichen Ansätzen zu ermöglichen. Auch im Rahmen des EU-Forschungsprogrammes Horizon2020 wurden Technologie-Reifegrade in 9 Level unterteilt angewandt (EU Kommission 2014). An TRLs bzw. den Fortschritt von einem TRL zum nächsten sind keine bestimmten Zeitskalen gebunden. Auch können Projekte prinzipiell in jeder Entwicklungsstufe scheitern.

In (Meschini, S., Laviano, F., Ledda, F., Pettinari, D., Testoni, R., Torsello, D., Panella, B. 2023) werden TRLs einiger kommerzieller Fusionsprojekte untersucht, darunter auch Firmen, die Kraftwerke basierend auf den Prinzipien der Trägheitsfusion entwickeln möchten. Zu einem der in Deutschland ansässigen Start-Ups, Marvel Fusion, heißt es dort *‘At the present time no roadmap or power plant design are available’* (Meschini, S., Laviano, F., Ledda, F., Pettinari, D., Testoni, R., Torsello, D., Panella, B. 2023). Der Technologie-Reifegrad von Marvel Fusion’s Plänen wird angegeben als *‘Technologies and proof of concept device being built and tested (by partners and collaborators)’*; als nächster kritischer Schritt wird *‘demonstrate scientific feasibility’* genannt (Meschini, S., Laviano, F., Ledda, F., Pettinari, D., Testoni, R., Torsello, D., Panella, B. 2023). Nimmt man die TRL-Definitionen aus (EU Kommission 2014), übersetzt sich dies etwa in ein TRL 3 *‘experimental proof of concept’*, an dem zur Zeit gearbeitet wird. Konzepte anderer Firmen, die in dem Papier beurteilt werden, schwanken zwischen TRL 1 und 4, wobei nur eine Firma bisher den Schritt zu *‘System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment’*, was nach (EU Kommission 2014) einem TRL 3-4 gleichkommt, erreicht hat. Dabei handelt es sich um die Entwicklung eines auf Magnetfusion basierenden Antriebssystems für die Raumfahrt.

Auch in einer Analyse für die EU Kommission (EU COM 2023) wird kein dort untersuchtes Projekt auf einen TRL höher als 3-4 eingestuft. Trägheitsfusionskonzepte werden auf TRL 2-3 eingestuft. Aus der Übersicht über verschiedene Magnet- und Trägheitsfusionskonzepte geht auch hervor, dass es 2022 kein einziges öffentlich finanziertes Forschungsprojekt für ein Kraftwerk basierend auf Trägheitsfusion gibt.

In (BMBF 2023a) wird *indirect drive* Ansätzen, wie bei NIF umgesetzt, ein TRL 3 zugeordnet, *direct drive* Ansätzen ein TRL 2 und *fast ignition* Ansätzen TRL 1. TRL 2 bedeutet nach (EU Kommission 2014), dass ein Technologiekonzept formuliert wurde, während bei TRL 1 grundlegende Funktionsprinzipien beobachtet wurden. Die Autoren schlüsseln den Fortschritt nach bestimmten Schlüsseltechnologien auf, die für ein funktionierendes Kraftwerk entwickelt werden müssen. Es werden genannt (siehe auch Abbildung 2-1),

¹ https://www.ipp.mpg.de/5434912/ITER_baseline_2024

- die Zündung und der Energiegewinn, der für eine kommerzielle Stromerzeugung ausreichend wäre,
- die Fertigung und Massenproduktion von Targetkapseln,
- die Komprimierungstechnologie zur Komprimierung der Kapseln mit der für einen Reaktoreinsatz notwendigen Energie, Effizienz und Wiederholrate,
- das Einbringen der Kapseln in den Reaktor und deren Nachverfolgung mit der erforderlichen Präzision und unter Reaktorbedingungen,
- das Konzept für eine Reaktionskammer und die Materialien für die erste Wand,
- die Umwandlung der freigesetzten Strahlung in nutzbare Wärme bei ausreichend hoher Temperatur für einen Dampfkreislauf,
- die physikalischen Grundlagen und Simulationswerkzeuge sowie
- die Verfügbarkeit von Messmethoden für die Diagnostik unter Reaktorbedingungen.

Die Internationale Atomenergieorganisation (*International Atomic Energy Agency*, IAEA) hat im März 2024 ein Dokument veröffentlicht, in dem TRLs spezifisch auf Fusionstechnologien angewandt werden (IAEA 2024). Darin werden auf dem TRL basierende Bewertungsrahmen für verschiedene Subsysteme von Fusionsreaktoren sowie für das ganze System aufgestellt. Bei TRL 3 sollte demnach aktiv mit Laborversuchen an Forschung und Entwicklung gearbeitet werden, um die Realisierbarkeit des Konzeptes zu zeigen. Dafür sollen die einzelnen Elemente durch Tests physisch geprüft und die Ergebnisse mit theoretischen Vorhersagen verglichen werden. Auf der nächsten Stufe, TRL 4, sollen grundlegende technologische Komponenten in einer Laborumgebung integriert werden. Dabei ist das System noch eher rudimentär und weit weg vom finalen System. Zwei konkrete Beispiele, die in (IAEA 2024) auf TRLs eingeordnet werden, beziehen sich auf die Magnetfusion: *breeding blanket* und *toroidal field coil fabrication* für ein japanisches DEMO-Konzept werden dort untersucht. Für das japanische DEMO-Konzept wird das *breeding blanket* als ganzes System auf TRL 4 geschätzt. Die Herstellung der toroidalen Magnetspulen wird mit TRL 6 angegeben basierend auf der Annahme, dass maßgeblich auf Erfahrungen aus der Produktion von Teilen für ITER zurückgegriffen werden kann. Da ITER noch nicht in Betrieb ist, wurden die Spulen noch nicht im operativen Betrieb getestet. Dies wird frühestens 2034 erfolgen.

In der Magnetfusion gibt es durch verschiedene Großprojekte, die in den letzten Jahren und Jahrzehnten gebaut wurden, einen gewissen technischen Erfahrungsvorsprung, was die Umsetzung angeht im Vergleich zu Laserfusion. Aus rein physikalischer Sicht ist Laserfusion allerdings weiter als Magnetfusion, da 2022 das erste Mal ein Energiegewinn rein im Fusionsprozess erreicht wurde, wenn auch kein Energiegewinn in der Gesamtbetrachtung.

Abbildung 2-1: TRL Einschätzung für 5 Fusionskonzepte der Trägheitsfusion nach Schlüsseltechnologien

The R&D status in this area is in general quite low, as indicated in the TRL self-assessment from the BRN report³:

IFE CONCEPTS →	LASER INDIRECT DRIVE	LASER DIRECT DRIVE (Including Shock ignition)	FAST IGNITION	HEAVY ION FUSION	MAGNET- ICALLY DRIVEN FUSION
CRITICAL ASPECTS FOR IFE DEVELOPMENT ↓					
Demonstration of ignition and reactor- level gain	4	3	2	1	3
Manufacturing and mass production of reactor compatible targets	2	2	2	2	1
Driver technology at reactor-compatible energy, efficiency, and repetition rate	4	4	3	2	3
Target injection, tracking, and engagement at reactor-compatible specifications	2	2	2	2	1
Chamber design and first wall materials	1	1	1	1	1

Table 5: TRL for five IFE concepts for the seven aspects critical for an IFE development path.

³ While there are ongoing discussions about the absolute values of the TRLs in Fusion in general, we take the table as an indication of the relative TRL of the individual elements of the IFE onion.

IFE CONCEPTS →	LASER INDIRECT DRIVE	LASER DIRECT DRIVE (Including Shock ignition)	FAST IGNITION	HEAVY ION FUSION	MAGNET- ICALLY DRIVEN FUSION
CRITICAL ASPECTS FOR IFE DEVELOPMENT ↓					
Maturity of Theory and Simulations	3	3	2	2	2
Availability of diagnostic capabilities for critical measurements	3	3	2	2	2

Table 5: TRL for five IFE concepts for the seven aspects critical for an IFE development path.

Quelle: (BMBF 2023a)

2.1.2 Offene Forschungs- und Entwicklungsfragen von Kernfusionskraftwerkskonzepten

Im Herbst 2023 veröffentlichte eine Gruppe Forscher einen Aktionsplan für die Zukunft der Trägheitsfusion in Europa (Batani D, Colaitis A, Consoli F, et al. 2023). Als Bereiche, in denen Herausforderungen in der Trägheitsfusion bestehen, werden dort genannt: Physik und Technologie von Trägheitsfusion, Entwicklung der Lasertechnologie für Trägheitsfusion und Entwicklung entsprechender Lasersysteme, Materialwissenschaften und Reaktortechnologie. Diese Bereiche umfassen grundlegende Punkte wie die Untersuchung ungelöster Probleme bei Laser-Plasma-Wechselwirkungen und hydrodynamischen Instabilitäten, Design sowie Entwicklung und

wirtschaftliche Massenproduktion von Brennstoffkapseln, Demonstration wiederholender Fusionszündung mit hoher Effizienz, Entwicklung von geeigneten Materialien und Entwicklung eines Systems zur Handhabung von Tritium.

Einen anderen Überblick mit einer ähnlichen Aufteilung über offene Forschungs- und Entwicklungsfragen bietet (BMBF 2023a), siehe auch Abbildung 2-1.

Einige der Inhalte aus (BMBF 2023a; Batani D, Colaïtis A, Consoli F, et al. 2023) werden nachfolgend zusammengefasst.

- Laser-Plasma-Wechselwirkungen

Bei der Umsetzung von ICF wird vor allem an den physikalischen Grundlagen gearbeitet und im Falle von NIF am Erreichen und Verbessern der Zündbedingungen. In (BMBF 2023a) wird auf die sehr kleine Menge an Fachexperten in dem Bereich hingewiesen. Ernsthaft würden weniger als 100 Experten an Konzepten für ICF arbeiten. Führend bei der Implosionsphysik, der Strahlungs-Hydrodynamik, der Strahlungs- und Röntgendiagnostik und bei den notwendigen Multiphysik Supercomputer-Simulationen sind vor allem die Kernwaffenlabore in den USA, da die Forschung bisher vor allem zum Verständnis der zugrundeliegenden Physik von Nuklearwaffen genutzt wurde.

Im Bereich der Strahlungs-Hydrodynamik-Modellierung gab es in den letzten Jahrzehnten einige Fortschritte. Gleichzeitig gibt es noch verschiedene Herausforderungen. Nur wenige Strahlungs-Hydrodynamik-Codes, die für lasergetriebene Implosionen geeignet sind, stehen *open access* zur Verfügung. Die an den Kernwaffenforschungseinrichtung der USA entwickelten Codes sind exportkontrolliert. Keiner der öffentlich zugänglichen Codes wurde umfassend mit Implosionsexperimenten validiert oder mit den in den amerikanischen nationalen Laboratorien verwendeten Codes verglichen. Darüber hinaus fehlen relevante physikalische Aspekte. Andere in der wissenschaftlichen Gemeinschaft breit genutzte Strahlungs-Hydrodynamik-Codes wurden bisher nicht auf ICF angepasst (BMBF 2023a).

- Brennstoffkapseln

Die Brennstoffkapseln für ein Laserfusionskraftwerk müssen in Massenfertigung hochpräzise hergestellt werden, mit Abweichungen an der Oberfläche in der Größenordnung von 10-100 nm. Um wirtschaftlich rentabel zu sein, dürfen sie dabei voraussichtlich nicht mehr als ein paar Eurocent pro Stück kosten (Batani D, Colaïtis A, Consoli F, et al. 2023). Dafür stehen zurzeit noch keine Technologien zur Verfügung.

Die Kapseln müssen dann in einer kryogenischen Kammer bei weniger als -253°C mit dem Deuterium-Tritium Brennstoff gefüllt werden, damit der Brennstoff bei der Komprimierung der Kapsel im gefrorenen Zustand ist. Die Befüllung erfolgt durch Beschichtung der Kapselwand mit einer Brennstoffschicht mit einer einheitlichen Filmdicke (BMBF 2023a).

Die Kapseln werden schließlich in die Brennstoffkammer eingebracht und mit dem gewählten ICF-Verfahren komprimiert und zur Zündung gebracht. Die Geschwindigkeit des Einbringens muss dabei mit etwa 50 – 200 m/s hoch sein, damit der gefrorene Brennstoff in der Kapsel nicht durch die Hitze in der Reaktionskammer auftaut. Bei der Zündung wird nicht der gesamte Brennstoff verbraucht. Das überschüssige Tritium muss anschließend aus der Reaktorkammer entfernt und chemisch wiederaufbereitet werden (BMBF 2023a).

Die Schritte der Fertigung, der Brennstoffbefüllung und das Einbringen in die Targetkammer müssen mit der Wiederholungsfrequenz der Laseranlage des ICF-Reaktors erfolgen (typischerweise 10-15mal pro Sekunde). Die Präzisions-Fertigung mit den jeweiligen Toleranzen ist technisch herausfordernd (BMBF 2023a). Gleichzeitig müssen die Kosten pro Brennstofftarget sehr niedrig liegen, um einen kommerziellen Einsatz eines Reaktors zu ermöglichen.

- Lasertechnologie

Laut (Batani D, Colaïtis A, Consoli F, et al. 2023) ist die Lasertechnologie für hochenergetische Laser noch weit davon entfernt, voll entwickelt zu sein. Die größten Herausforderungen sehen sie in der durchschnittlichen Leistungsfähigkeit und Effizienz und im Übergang von zurzeit verwendeten Lasern mit Pulsen ein- oder mehrmals am Tag zu den notwendigen hohen Repetitionsraten für Fusionskraftwerke. Basierend auf theoretischen Studien erwarten sie in den nächsten 10 Jahren Sprünge in der Leistungsfähigkeit und Effizienz.

In (Häfner et al. 2022) werden Status und Perspektiven von hochenergetischen Lasern für Trägheitsfusion diskutiert. Noch seien Laser zu teuer für Kernfusion als Geschäftsmodell. In einem Rechenbeispiel kommen (Häfner et al. 2022) zu dem Schluss, dass für ein Fusionskraftwerk mehr als die jährliche weltweite Produktion an Laserdioden nötig sei. Um Laser mit der notwendigen Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit zu einem wirtschaftlichen Preis in Massenproduktion herzustellen, werden dort Investitionen über 5-10 Jahre für Forschungs- und Entwicklungsarbeit gefordert. Unter anderem müsste es Verbesserungen in der Halbleiter-, Optik- und Kühlungstechnologie geben, um optische Schäden zu vermeiden und eine hohe Effizienz, Helligkeit und Langlebigkeit der Dioden zu gewährleisten.

- Materialforschung

Die erwarteten Neutronenflüsse in Fusionsreaktoren stellen hohe Anforderungen an das umgebende Material. Es wird an verschiedenen Stahllegierungen geforscht, die möglichst geringe Aktivierung durch Neutronen mit sich bringen würden. Allerdings erfüllen solche Materialien häufig nicht die hohen mechanischen Anforderungen, die an sie gestellt werden und werden zum Beispiel spröde. Eine Übersicht über verschiedene Materialien und ihre Probleme in Bezug auf die spätere Entsorgung ist in (Bailey et al. 2021) gegeben.

Die zunehmende Versprödung des Materials und Materialschäden machen einen Austausch der ersten Wand im Reaktor und der Tritiumbrutblankets notwendig. Nur wenn die eingesetzten Materialien ausreichend resistent gegenüber der Strahlungsumgebung sind, kann der Reaktor lange genug ohne Austausch der Komponenten betrieben werden, so dass ein kommerzieller Betrieb möglich wird. Notwendige Austauschzeiten aufgrund der Materialschäden liegen für heute bekannte Materialien bei wenigen Jahren. Typischerweise sollten für einen kommerziellen Betrieb die Austauschintervalle größer als alle 5-7 Jahre sein.

Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der ersten Wand. ICF hat hier einen Vorteil gegenüber den Magneteinschlussreaktoren, da aufgrund der sphärischen Symmetrie die Belastung der ersten Wand gleichmäßig erfolgt und dadurch die maximale Strahlenbelastung deutlich niedriger liegt als in Fusionsreaktoren mit Magneteinschluss mit deren nichtsphärischen Geometrie.

Ebenfalls müssen die eingesetzten Stähle für die Reaktorstruktur so gewählt werden, dass möglichst wenig Spurenelemente im Stahl enthalten sind, die zu einer höheren Aktivierung des Stahls führen würden und zu längeren Abklingzeiten bei der Nutzung. Die Kategorisierung der Abfälle als mittel- oder schwachradioaktiv und die notwendigen Zwischenlagerzeiten sind ebenfalls von dieser Materialentwicklungsfrage betroffen.

Fortschritte in theoretischen Studien zur Materialforschung aus den letzten Jahren müssen noch experimentell überprüft werden. Dafür wurde schon 1994 das internationale Projekt IFMIF (*International Fusion Materials Irradiation Facility*) gestartet, jedoch seither immer wieder verschoben. Aktuell laufen Planungen, eine Experimentieranlage in Spanien zu bauen. Das sogenannte IFMIF-DONES (*International Fusion Materials Irradiation Facility – DEMO Oriented Neutron Source*) soll nach aktuellem Zeitplan 2034 in Betrieb gehen (IFMIF-DONES España 2023). Bis dahin, bzw. bis zur Inbetriebnahme von ITER, wird es keine große Experimentieranlage geben, die dafür ausgelegt ist, Materialien unter dem harten und intensiven Neutronenbeschuss wie er in Fusionsreaktoren zu erwarten ist, ausführlich zu testen.

Da ein Austausch der Reaktorkomponenten aufgrund des Strahlenumfelds nur ferngesteuert erfolgen kann, muss die entsprechende robotische Anlage absolut robust und zuverlässig sein. Ein Versagen des robotischen Austauschs würde sonst zum Stillstand oder Verlust der Anlage führen, da kein händischer Eingriff zeitnah möglich ist. Dies soll ebenfalls in den zukünftigen Experimentieranlagen erprobt werden.

- Tritium

Sowohl die Verfügbarkeit als auch die Handhabung von Tritium stellen Herausforderungen für den Betrieb von Fusionsreaktoren dar. Tritium kommt natürlicherweise selten vor und muss erzeugt werden.

In einem Fusionskraftwerk mit einer Leistung von 2,5 GW(th), das auf der D-T Reaktion beruht, werden täglich ca. 400 g Tritium nachproduziert, um das Inventar von einigen Kilogramm zu erhalten. Hierfür ist eine extrem komplexe chemische Prozessierung notwendig, um das in Blankets produzierte hochflüchtige Tritium einzufangen, aufzubereiten und wieder dem Plasma zuzuführen. Eine ausreichend hohe Tritiumbrutrate eines Reaktors ist Voraussetzung für den dauerhaften Betrieb eines Fusionsreaktors.

In (Kovari et al. 2017) und (Pearson et al. 2018) wird argumentiert, dass Tritium für den Start mehrerer Fusionsreaktoren knapp werden könnte. Allein für ITER werden im Laufe der Lebenszeit 18 kg Tritium benötigt (Pearson et al. 2018). Schon die Bereitstellung von Tritium für die ersten DEMO Reaktoren ist herausfordernd (Pearson et al. 2018). Die DEMO-Reaktoren sollen dann den Eigenbedarf stillen und genug Tritium für nachfolgende Reaktoren erzeugen. Sollte es beim Bau von DEMO-Reaktoren zu ähnlichen Verzögerungen kommen wie bei ITER würde sich auch die Erzeugung von genug Tritium für weitere Fusionsreaktoren verzögern. Ebenfalls würden weitere Fusionsexperimente und Prototypen von Start-Up Firmen für den Betrieb Tritium benötigen.

Der Großteil der weltweiten Tritiumvorräte befindet sich in den Kernwaffenarsenalen der Kernwaffenstaaten und steht nicht zur Energieerzeugung zur Verfügung. Vielmehr steht auch hier die Notwendigkeit der Nachproduktion von Tritium in Konkurrenz zur Produktion für Fusionsreaktoren.

Noch gibt es Schwerwasser-Kernreaktoren, in denen Tritium im Schwerwasser erzeugt wird. Derzeit befinden sich 2 Anlagen zur Extraktion von Tritium aus Schwerwasser mit einer Produktion von etwa 130g pro Jahr in Betrieb (Pearson et al. 2018; Ni et al. 2013). Durch eine begrenzte weitere Laufzeit von Schwerwasserreaktoren und die relativ kurze Halbwertszeit von Tritium von etwa 12,3 Jahren könnte es zu Engpässen kommen. Eine Tritium-Produktion für das Anfangsinventar könnte ebenfalls in Leichtwasserreaktoren erfolgen. Dies wird für das Kernwaffenarsenal der USA bereits im Reaktor Watts Bar durchgeführt und in Frankreich soll dies im Kernkraftwerk Civaux erfolgen (IPFM 2024). Die Produktionsmengen sind pro Reaktor jedoch begrenzt, da das Tritium in das Kühlwasser diffundiert und Grenzwerte nicht überschreiten darf.

Nach Inbetriebnahme werden Fusionsreaktoren ihr eigenes Tritium ‚erbrüten‘ müssen. Zu wenig Tritium ist ein Risiko für den andauernden Betrieb der Anlage, während zuviel Tritium ein Sicherheitsrisiko darstellen kann. Letzteres wird weiter unten diskutiert. Zum Erbrüten wird vor allem eine Reaktion über Neutroneneinfang von Lithium-6 oder -7 untersucht. Der physikalische Prozess wird auch in den Leichtwasserreaktoren genutzt, um Tritium zu erzeugen. Eine entsprechende Technologie für Fusionsanlagen befindet sich aber noch in einem frühen TRL und es wurde bisher nicht experimentell gezeigt, dass Tritium in einem Fusionsreaktor erfolgreich erbrütet, aufgefangen und wiedergenutzt werden kann (Chapman und Walkden 2020).

Die Neutronenbilanz im Reaktor macht es erforderlich, einen Neutronenmultiplikator einzusetzen, um Tritiumverluste u.a. durch radioaktiven Zerfall (Tritium hat eine Halbwertszeit von etwa 12,3 Jahren) zu ersetzen. Tritium ist wie alle Wasserstoffisotope hochflüchtig, bzw. lagert sich in Materialien ein und bildet Moleküle mit anderen Elementen. Als Neutronen vervielfältigende Materialien werden Beryllium oder Blei diskutiert. Hinzu kommt, dass wie oben geschildert bei einer Nutzung der Fusionsenergie in Zukunft auch die Anfangsinventare an Tritium für weitere Fusionsreaktoren erzeugt werden müssen. Ebenfalls ist die Tritiumrückgewinnung aus unverbrannten Tritium in der Reaktionskammer, bzw. von Fertigungsverlusten bei der Targetherstellung wichtig, aber technisch sehr aufwändig.

Die Tritiumbrutrate, also die Überproduktion an Tritium, ist daher eine entscheidende Größe bei der Bestimmung eines Reaktorkonzepts. Experimentelle Ergebnisse mit Tritium-Brutblankets sind daher unverzichtbar auf dem Weg zu einem funktionierenden und kommerziell erfolgreichen Reaktorkonzept.

Die Kombination aus tritiumbrütendem, neutronenmultiplizierendem Material, strahlungsresistentem Strukturmaterial und der Anforderung, die Wärme der Reaktorkammer abzutransportieren, bestimmt die Wahl des Brutblanketkonzepts. Aktuell gibt es einige unterschiedliche Ansätze, aus welchen Materialien die sogenannten *breeder blankets* bestehen könnten und ob sie zum Beispiel mit festem kugelförmigem oder flüssigem Brutmaterial funktionieren. Verschiedene Brutblanketkonzepte für Magneteinschlussfusion sollen am ITER-Experiment erprobt werden. Die Ergebnisse sind im Prinzip auf ICF-Reaktoren übertragbar.

- Kommerzielles Kraftwerk

Eine weitere große Herausforderung ist die Entwicklung eines kommerziellen Fusionskraftwerkkonzepts, in dem die Schritte von der Freisetzung der Energie in der Fusion

zu Strom im Netz konkret umgesetzt werden sollen und das auf einem zukünftigen Strommarkt konkurrenzfähig ist.

Hierzu gibt es bei ICF nur sehr wenige erste vorbereitende Studien zu möglichen Reaktorkonzepten wie etwa das europäische HiPER-Projekt (*European High Power Laser Energy Research Facility*) mit *direct drive* oder das LIFE-Projekt des LLNL (siehe auch Abschnitt 2.1.3 und 2.1).

Neben vielen offenen Fragen ist vor allem die Kombination an Anforderungen in den Brutblankets eine Herausforderung. Die Blankets dienen eigentlich dazu, die Energie der Fusionsneutronen durch Stöße am Blanketmaterial (häufig flüssiges Blei oder Blei-Wismut) in Wärme zu übertragen. Die Wärme wird dann genutzt, um ein Kühlmittel (z.B. Wasser oder Gas) zu erhitzen, das dann die Wärme abgibt um schließlich mit Wasserdampf Strom in einem Generator zu erzeugen. Die Brutblankets müssen dem Aufprall der Neutronen auf die erste Wand widerstehen, die Neutronenenergie in Wärme umwandeln, die Wärme abführen, für Neutronenvermehrung sorgen, Tritium erbrüten, Tritium abtransportieren, dahinterliegende Reaktoreinbauten vor Strahlung schützen, die Reaktorinnenkammer abdichten, möglichst lange einsetzbar und billig sein und eine möglichst hohe Betriebstemperatur erreichen, um die Umwandlung von Wärme in Strom möglichst effizient umzusetzen usw..

Ein wesentlicher Vorteil von ICF gegenüber der Magneteinschlussfusion ist allerdings, dass geometrisch, aufgrund der sphärischen Energiefreisetzung, und durch den Wegfall der komplexen supraleitenden Spulen zur Erzeugung von Magnetfeldern, mehr konstruktiver Spielraum besteht, zumindest solange keine zusätzlichen Einrichtungen wie Magnetfelder genutzt werden, z. B. um die Heliummasche gezielt aus der Reaktionskammer abzuleiten.

Auch nach vielen Jahrzehnten der Forschung bestehen zahlreiche ungelöste physikalische und technisch-ingenieurswissenschaftliche Herausforderungen auf dem Weg bis zur nutzbaren Energiequelle. Der TRL vieler benötigter Technologien ist noch sehr gering. Vor allem die Materialentwicklung und die Entwicklung eines Blanketkonzepts erfordert eine zeitaufwändige experimentelle Erprobung in Experimental- oder Demonstrationsanlagen vor dem Bau eines ersten kommerziellen Fusionskraftwerks. Hierfür sind internationale experimentelle Einrichtungen wie ITER oder IFMIF unverzichtbar, die sich derzeit jedoch noch in der Planung bzw. Bau befinden.

2.1.3 Abschätzungen zu Zeitbedarf und Kosten der Entwicklung von Kernfusionskraftwerken

Am Lawrence Livermore National Lab (LLNL), an der auch NIF angesiedelt ist, gab es von 2008 bis 2013 das Projekt *Laser Inertial Fusion Energy* (LIFE), welches mehrere Optionen für auf Laserfusion basierende Kraftwerke erarbeitete (Meier et al. 2014). Ziel war eine frühzeitige kommerzielle Vermarktung von Kernfusionskraftwerken. Nach Ausbleiben von Erfolgen bei NIF wurde das Projekt eingestellt.

In der EU wurde von 2008 bis 2013 das Forschungsprojekt *European High Power Laser Energy Research Facility* (HiPER) gefördert. Als das Projekt startete, erwartete man, dass es während der Projektlaufzeit zu ersten Fusionszündungen bei NIF kommen würde. HiPER sollte somit den weiteren Weg zu einem Fusionskraftwerk basierend auf Trägheitsfusion ebnen. Nachdem Zündungserfolge bei NIF ausblieben, wurde das Projekt nach 2013 nicht verlängert.

Laut (Batani D, Colaïtis A, Consoli F, et al. 2023) wird es in den Jahren 21-30 nach Start eines europäischen Nachfolgeprojektes zu HiPER zu einem Demonstrationsreaktor kommen. Beginnend von der Veröffentlichung des Dokumentes entspricht dies frühestens den Jahren 2044-2053. Eine Abschätzung zu den dafür anfallenden Kosten enthält das Papier nicht.

In (Ditmire et al. 2023) stellen Focused Energy, eine in Deutschland ansässige Firma, die auf Trägheitsfusion per *fast ignition* setzt, ihre Technologie sowie den anvisierten Zeitplan dar. Demnach meint die Firma, ein Pilotkraftwerk sei in den 2030ern, ein volles Fusionskraftwerk innerhalb der nächsten zwei Jahrzehnte möglich. Ausgehend vom Veröffentlichungsjahr 2023 ergibt dies spätestens 2043.

In (Meschini, S., Laviano, F., Ledda, F., Pettinari, D., Testoni, R., Torsello, D., Panella, B. 2023) wird neben der Diskussion von offenen Forschungsfragen ein Zeitrahmen für die Entwicklung eines Kernfusionskraftwerks basierend auf den Prinzipien der Trägheitsfusion aufgestellt. Sie stellen fest, dass die Zeitpläne privater Firmen im Allgemeinen sehr viel kürzer sind als die von öffentlich finanzierten Forschungsinstituten. Während sie Gründe anführen, weshalb Firmen optimistischer sein können als öffentliche Forschungsinstitute, was die Zeitskalen angeht (z. B. Fokussierung auf Kommerzialisierung, nur ein konkretes Projekt, effizienteres Projektmanagement), so erwähnen sie auch, dass aus wissenschaftlicher Sicht Zweifel an diesen Zeitskalen ausgedrückt wurden. Sie betonen, dass es trotz des aktuellen Enthusiasmus über die Kernfusion auch bei etablierten Techniken wie dem Bau von Atomkraftwerken zu massiven Verzögerungen kommen kann. Zusätzlich kann angenommen werden, dass die noch kleinen Start-ups mit zunehmendem TRL ihrer Produkte wachsen werden und die letztendlichen möglichen Bauprojekte von Kernfusionskraftwerken ähnliche Großprojekte werden wie aktuelle Fusionsforschungsreaktoren oder auch Atomkraftwerke.

Bei dem internationalen Forschungsreaktor ITER (*International Thermonuclear Reactor*) wurde vor Kurzem der Zeitplan weiter nach hinten verschoben (ITER 20.06.2024). Erste Planungen für ITER gab es bereits in den 1990ern; offiziell startete das Projekt 2006. Die derzeitigen Planungen für ITER sehen eine Inbetriebnahme 2034-2036 vor. Mit ersten Tritiumexperimenten soll 2039 begonnen werden.²

(Meschini, S., Laviano, F., Ledda, F., Pettinari, D., Testoni, R., Torsello, D., Panella, B. 2023) schreiben, dass es herausfordernd sei, die Kosten zukünftiger Kernfusionsreaktoren abzuschätzen. Allerdings könne man davon ausgehen, dass große Investitionen nötig sein werden und zitieren Zahlen von 5-6 Milliarden US-Dollar für einzelne Pilot-Projekte. Dabei handelt es sich allerdings um Magnetfusionsansätze.

Die Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina schätzt, dass eine finanzielle Förderung von 20 Milliarden Euro verteilt über 20 Jahre notwendig sein wird, um ein Magnetfusionskraftwerk zu realisieren (Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina 2023). In einem Diskussionspapier der Leopoldina zur Transformation des Energiesystems wird allerdings auch dargestellt, dass Kernfusion zur ‚Erreichung der Klimaneutralität bis 2045 voraussichtlich keine Rolle spielen wird‘ (Edenhofer et al. 2023)

In einer Analyse zur Fusionsenergie stellt der US-amerikanische Rechnungshof fest, dass noch viele Herausforderungen auf dem Weg zu kommerzieller Fusion überwunden werden müssten und die Zeitabschätzungen dafür von 10 Jahren bis zu mehreren Jahrzehnten reichten (GAO 2023). Die

² https://www.ipp.mpg.de/5434912/ITER_baseline_2024

Punkte, die sie dabei diskutieren, sind im Wesentlichen die gleichen wie in (Meschini, S., Laviano, F., Ledda, F., Pettinari, D., Testoni, R., Torsello, D., Panella, B. 2023). Es heißt ebenso, dass die Kosten kommerzieller Fusion ungewiss seien und Kostenschätzungen daher unzuverlässig.

In einem Diskussionspapier der Helmholtz-Gemeinschaft (Helmholtz Task Force "Laserbasierte Fusionsforschung" 2023) werden für 'den schnellsten Weg zu einem Magnetfusionskraftwerk' 20-25 Jahre angesetzt. Für Forschung, Entwicklung und Bau seien dafür Investitionen von etwa 20 Milliarden Euro notwendig.

Viele der Untersuchungen, die konkrete Zeitskalen vorschlagen, gehen davon aus, dass die Forschung mit dem benötigten Aufwand für alle Herausforderungen parallel erfolgen wird. Dies ist jedoch eine unrealistische Annahme, selbst wenn z.B. die technologische Eigendynamik bestimmter Technologiebereiche wie in der Laserentwicklung genutzt werden kann. Häufig ist es so, dass zunächst Schlüsseltechnologien erschlossen werden müssen und eine entsprechende Risikominimierung erfolgt, bevor Investitionen in andere Entwicklungsbereiche im erforderlichen Aufwand getätigt werden. Entscheidend ist hier z.B. die Materialentwicklung. Konsequenterweise werden in den Expertenempfehlungen daher häufig Bereiche hervorgehoben, die besonders entscheidend für ein Gelingen der Entwicklungsagenda sind und andere Entwicklungs Herausforderungen werden hintenangestellt. Dies verlängert dann die notwendigen Zeiträume, da eher sequentiell als parallel vorgegangen wird.

Experimente zur Entwicklung von Materialien, die einer intensiven Strahlenbelastung ausgesetzt sind, sind sehr zeitaufwändig. Zunächst müssen die Materialien so lange bestrahlt werden, bis die Bestrahlungsbedingungen des Fusionsreaktors im Experiment erreicht wurden. Je nach Intensität der Bestrahlungseinrichtung und nach eingesetzten Simulationsmodellen und vorhandenen Daten kann ein Experiment Wochen oder Monate bis zu mehreren Jahren dauern. Die Nachbestrahlungsuntersuchungen können dann erst nach einer Abklingzeit durchgeführt werden. Der Zeitbedarf für jede Experimentierreihe ist daher hoch, bevor Ergebnisse für das nächste Experiment genutzt werden können. Typische Untersuchungsgegenstände sind dabei z.B. die Verwendung von Legierungselementen, Unterschiede hinsichtlich der eingesetzten Fertigungsverfahren, die Veränderung grundsätzlicher materialtechnischer Eigenschaften unter mechanischer und thermischer Belastung, die Aktivierungseigenschaften des Materials etc..

Zeitersparnis könnte durch die Umgehung von Experimentier- und Demonstrationsschritten erreicht werden. Vor allem kommerzielle Akteure wählen häufig aufgrund ihrer höheren Risikobereitschaft einen solchen Pfad. Dies ist allerdings ein Entwicklungspfad, der dann mit entsprechenden Risiken behaftet ist. Zum einen ist die Lernkurve im Umgang mit einer Vielzahl neuer, zuvor nicht erprobter Technologien und Materialien und deren Zusammenspiel sehr steil. Dies erfordert üblicherweise eine ausgiebige Erprobungs- und Testphase durch kleinteilige Experimente in Experimentier- und Demonstrationsanlagen. Zum anderen erschwert ein Überspringen von Entwicklungsschritten die Möglichkeit, bei Problemen zu einem früheren Entwicklungsschritt zurückzukehren und einen anderen Pfad einzuschlagen. Technische Probleme, die erst sehr spät in der Entwicklung auftauchen, können dann zu erheblichen Zeitverzögerungen bzw. zum Scheitern des Projekts führen.

Eine andere Möglichkeit ist eine Parallelisierung von Entwicklungsschritten. So wird z.B. bei der Magnetfusion diskutiert, den Bau eines Demonstrationskraftwerks schon vor der Inbetriebnahme von ITER zu beginnen. Dies ist ebenfalls mit Risiken behaftet, da einige Erkenntnisse aus dem Betrieb von ITER dann in der Design- und Bauphase nicht in den Demonstrationsreaktor einfließen können. Ebenfalls ist dann eine sehr enge Verzahnung zwischen beiden Projekten notwendig, um

gewonnene Erkenntnisse schon frühzeitig zu nutzen. Eine solche Verzahnung birgt wiederum eigene Fehlerpotentiale.

Fusionsreaktoren sind extrem komplexe Großanlagen. Entsprechende Nachteile solcher Großanlagen sind eine geringe Resilienz bei Ausfall der Anlage, hoher Bedarf an hochspezialisierten Fachkräften und Zulieferertechnologien mit entsprechendem Ausbildungs- und Infrastrukturbedarf, geringe Stückzahlen und geringe Standardisierung sowie lange Bauzeiten mit dem Problem der Vorfinanzierung. Alle diese Punkte wirken sich negativ auf die Kosten aus.

Zur Bezahlbarkeit von Fusionskraftwerken lassen sich aktuell noch keine verlässlichen Aussagen treffen. Aus heutiger Sicht ist angesichts des benötigten Forschungs- und Entwicklungsbedarfs der Bau kommerzieller ICF-Fusionsreaktoren für einen nennenswerten Beitrag zur Erreichung von Klimazielen vor 2050 extrem unwahrscheinlich.

2.2 Entsorgung der radioaktiven Abfälle

Anders als bei Atomkraftwerken, die auf Kernspaltung beruhen, ist die Erwartung, dass in Kernfusionsreaktoren keine langlebigen hochradioaktiven Abfälle entstehen. Es gibt jedoch zwei maßgebliche Quellen radioaktiven Abfalls:

- Durch die hohen Neutronenflüsse werden Materialien wie Stahl und das Material der ersten Wand aktiviert, was zu hochaktiven kurzlebigen und großen Mengen schwach- und mittelradioaktiven Abfällen führen wird (Bailey et al. 2021; Gonzalez de Vicente et al. 2022). Einige Teile der Kraftwerke werden schon nach wenigen Jahren ausgetauscht werden müssen, nicht erst beim Rückbau. Für diese möglicherweise hochaktivierten Strukturteile werden aus Strahlenschutzgründen noch Fernbedienungstechniken entwickelt werden müssen (Chapman und Walkden 2020).
- Zusätzlich entstehen radioaktive Abfälle durch das im Kraftwerk vorhandene Tritium. Als schweres Isotop von Wasserstoff kann Tritium relativ leicht viele Materialien durchdringen. Daher ist davon auszugehen, dass Teile des Kraftwerks mit Tritium kontaminiert sein werden und daher auch radioaktiv sind. Zur Behandlung dieser Abfallströme werden noch Technologien entwickelt werden müssen (Bailey et al. 2021).

In (Gonzalez de Vicente et al. 2022) werden die möglicherweise in einem Kernfusionskraftwerk entstehenden Abfallströme analysiert. Bisher ist zwar noch unklar, aus welchen Materialien die Reaktorkammer und weitere Teile von möglichen Kraftwerken bestehen werden. Um die Aktivierung von Stahl möglichst gering zu halten, müssen radioaktive Kontaminationen durch Isotope wie C-14, Ni-59 oder Nb-94 bei der Herstellung vermieden werden. Beryllium, das in Designstudien häufig in ‚breeder blankets‘ für eine höhere Tritiumproduktionseffizienz eingebaut wird, ist oft mit Uran kontaminiert. Aufgrund der zu erwartenden Menge an Beryllium in einem Fusionskraftwerk, könnten somit einige Kilogramm an Uran im Material zusammenkommen und durch Wechselwirkungen mit Neutronen auch transuranische Aktinide entstehen, wenn das Beryllium nicht besonders rein ist.

Um entstehende hohe Kosten durch Entsorgung großer Mengen an mittel- und schwachradioaktiven Abfalls zu vermeiden, ist es essentiell, schon beim Design der Kraftwerke und der Auswahl der Materialien den Rückbau mitzudenken (L. El-Guebaly et al. 2017). In den USA zum Beispiel würden aktuelle Endlager für schwachradioaktiven Abfall durch Fusionskraftwerke aufgrund der anfallenden Mengen sehr schnell gefüllt werden.

2.3 Nichtverbreitungsaspekte

Grundsätzlich bestehen mögliche Proliferationsrisiken bei der Nutzung von Fusionsanlagen, die auf der Deuterium-Tritium Fusion beruhen und eine signifikante Anzahl an schnellen Neutronen produzieren:

1. Die Neutronen könnten im Prinzip genutzt werden, um Spaltmaterialien wie Plutonium aus fertilem Ausgangsmaterial wie Uran zu produzieren.
2. Die Verfügbarkeit großer Mengen an Tritium kann zu einer Abzweigung des Materials für militärische Zwecke genutzt werden.
3. Die Forschung an der Laser-Trägheitsfusion eröffnet Möglichkeiten, erworbenes Wissen in einen militärischen Kontext einzubringen (*Dual-Use*).

2.3.1 Potential zur Spaltmaterialproduktion

Die Möglichkeit, spaltbares Material in Fusionsreaktoren zu erzeugen, wurde vor allem für Reaktoren untersucht, die auf dem Magneteinschlussprinzip beruhen (Glaser und Goldston 2012; Franceschini et al. 2013; Franceschini und Englert 2013; Diesendorf et al. 2023). Da Fusionskraftwerke beträchtliche Mengen an Neutronen erzeugen, können erhebliche Mengen an spaltbarem Material wie Plutonium in den Blankets eines Fusionsreaktors erzeugt werden. Wird Uran in die Blankets eingebracht, z.B. in Form fester Strukturen, gelöst im flüssigen Blanketmaterial oder auch in Form kleinster beschichteter Partikel, wird das Uran mit Neutronen bestrahlt und es entsteht Plutonium. Dies ist ähnlich wie in einem Kernreaktor, die Neutronen stammen jedoch aus der Fusionsreaktion und nicht aus der Kernspaltung.

Hypothetische Produktionszahlen für Spaltmaterial wurden für kleine Fusionsanlagen mit Magneteinschlussfusion von (Glaser und Goldston 2012) und für Kraftwerke von (Franceschini et al. 2013) vorgelegt. Je nach Menge des Urans und der Anzahl und der Energieverteilung der Neutronen können signifikante Mengen an Plutonium erzeugt werden. Aufgrund der hohen Neutronenenergien ist der Isotopenvektor des entstehenden Plutoniums waffengrädig (d.h. der Anteil des Isotops Plutonium-239 im Plutonium ist größer als 93%). Selbst mit Mengen an Ausgangsmaterial (Natururan oder abgereichertes Uran), die von *safeguards* ausgenommen werden können (<10 t Natururan) (Englert und Harrington 2016) sind in Fusionskraftwerken signifikante Mengen an Plutonium pro Jahr (>8 kg/a) produzierbar. Das Uran und das entstandene Plutonium müssten nach der Entstehung aus den Blankets entfernt und Plutonium von Uran separiert werden.

In reinen Fusionskraftwerken ist kein fertiles Material wie Uran im Anlagendesign vorgesehen. Es müssten daher gewisse Umrüstungen der Anlage vorgenommen werden, um fertiles Material zum Erbrüten von Spaltstoffen in die Anlage einzubringen. In solchen Fusionsanlagen sollte problemlos z.B. anhand der Anwesenheit von flüchtigen Spaltprodukten, oder durch Gewichtsüberprüfung von Anlagenteilen oder des Kühlmittels überprüfbar sein, ob in der Anlage Uran oder anderes fertiles Material wie Thorium mit Neutronen bestrahlt wird. Dennoch ist es wichtig, entsprechende Methoden frühzeitig zu entwickeln und zu erproben und im Anlagendesign Überwachungsmaßnahmen vorzusehen (*Safeguards by Design*). Entsprechende Forschungsprogramme könnten z. B. im Rahmen des ITER Versuchsreaktors durchgeführt werden (Diesendorf et al. 2023; Franceschini et al. 2013; IAEA 2013). ITER selber beinhaltet kein Proliferationsrisiko in Hinsicht auf die Spaltmaterialproduktionsmöglichkeiten (IAEA 2013).

Daneben gibt es auch seit vielen Jahrzehnten Überlegungen, Fusion-Fission-Hybrid-Reaktoren zu konzipieren. Dies ist vor allem auf die Notwendigkeit zurückzuführen, größere Mengen an Tritium zu Erbrüten, falls die Tritiumbrutrate und damit der Tritiumüberschuss eines Fusionsreaktorkonzepts nicht groß genug wäre, um Inventare für weitere Fusionskraftwerke zu produzieren (siehe 2.1.2). So muss auch für die ersten Fusionsanlagen das Tritiuminventar in herkömmlichen Spaltreaktoren erzeugt werden (z.B. im Schwerwasser von Schwerwasserreaktoren oder mit Lithiumtargets in Leichtwasserreaktoren). Zusätzliche Neutronen aus der Spaltung von Aktiniden würden in solchen Fusion-Fission-Hybrid-Reaktoren die Neutronenbilanz deutlich verbessern.

Der Rahmen für die Einbeziehung von Fusionskraftwerken in die derzeitigen Verifizierungsregelungen der IAEA ist unklar (Englert und Harrington 2016). In reinen Fusionsanlagen treffen viele Definitionen, die sich auf die Kernspaltung beziehen, nicht zu. Ebenfalls ist im regulären Betrieb der Einsatz von spaltbaren und fertilen Materialien nicht vorgesehen. Viele Überwachungsmaßnahmen beziehen sich aber spezifisch auf die Materialflüsse von Spaltmaterial (Uran-235, Plutonium, Uran-233) und fertilem Material (Uran, Thorium) in den dazugehörigen Brennstoffkreisläufen von Spaltreaktoren. Eine entsprechende Klärung der Verifizierungsregelungen für reine Fusionskraftwerke wäre daher für die zukünftige Nutzung von Fusionskraftwerken zu empfehlen (IAEA 2013), da angemessene internationale Überwachungsmaßnahmen unausweichlich sind. Fusion-Fission-Hybrid Anlagen würden aufgrund der Auslegung immer spaltbares Material enthalten und daher von den derzeitigen Überwachungsmaßnahmen erfasst werden. Zusätzlich sind Methoden zu entwickeln, um die heimliche Nutzung von Fusionsanlagen zur Spaltmaterialproduktion zu detektieren.

2.3.2 Einsatz von Tritium

Tritium wird in modernen Kernwaffen zur Verstärkung des *yields* (der Sprengkraft) und zur Verbesserung der Zuverlässigkeit einer Kernwaffe eingesetzt. Typische Mengen, die sich in einer Kernwaffe befinden liegen im Grammbereich (< 20 g). Tritium hat eine relativ kurze Halbwertszeit von 12,3 Jahren. In den Kernwaffenarsenalen muss daher das Tritium ständig nachproduziert werden.

Das Tritiuminventar eines einzelnen Fusionsreaktors wird die existierenden Tritiumvorräte der Atomkräfte typischerweise um mindestens eine Größenordnung übersteigen und könnte somit ein ideales Reservoir darstellen. Die Materialbilanz für Tritium in einem Fusionskraftwerk mit einer Genauigkeit durchzuführen, dass die Abzweigung einer relativ kleinen Menge detektieren könnte, ist extrem aufwändig.

Wenn die Tritiumbrutrate groß genug ist, kann auch ein Überschuss für die Inbetriebnahme weiterer Fusionsanlagen erzeugt werden. Dies würde dann aber auch eine Abzweigung für ein militärisches Programm erleichtern. Wenn die Tritiumbrutrate nur den Eigenbedarf eines Reaktors stillt, würde die Abzweigung größerer Mengen an Tritium, ohne dabei detektiert zu werden, schwieriger.

Weltweit gibt es keine Überwachungsmaßnahmen für Tritium so wie sie für Spaltstoffe durch die IAEA existieren. Es gibt jedoch seit vielen Jahren die Forderung, der Tritiumproblematik mehr Aufmerksamkeit zu widmen (IAEA 2013) bzw. ein adäquates Überwachungssystem zu schaffen (Kalinowski 1993; Kalinowski und Colschen 1995; Kalinowski 2004). Mögliche zukünftige Entwicklungen in Richtung von Tritium-Überwachungsmaßnahmen sollten daher unbedingt von Anfang an in Anlagendesigns ziviler Fusionskraftwerke mit eingeplant werden (*Safeguards by Design*), um spätere Probleme zu vermeiden.

2.3.3 Potential zur vertikalen Proliferation

Seit den Verhandlungen zum Umfassenden Teststoppverbotsvertrag (*Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty*) und der Gründung der Organisation über das umfassende Verbot von Nuklearversuchen (CTBTO) wurden, mit Ausnahme der französischen (1995-1996), indischen (1998) und pakistanischen Tests (1998), Kernwaffentests nur noch von Nordkorea durchgeführt (2006-2017).

Die Weiterentwicklung von Kernwaffen hat sich jedoch in den fortgeschrittenen Kernwaffenstaaten in milliardenschweren Programmen zur Simulation aller wesentlichen Eigenschaften von Kernwaffen mit Hilfe von leistungsstarken Supercomputerarchitekturen fortgesetzt. Die Virtualisierung wird durch umfangreiche Experimentiereinrichtungen zur Gewinnung relevanter Daten unterstützt z.B. zum Zustand von Materie unter extrem hohen Drücken und Temperaturen. In den USA wurde diese Mission durch die Laserträgheitsfusionsanlage National Ignition Facility (NIF) an der Kernwaffenforschungseinrichtung Lawrence Livermore National Laboratory in Kalifornien im Rahmen des sogenannten *Stockpile Stewardship Program* durchgeführt.

NIF hat eine überwiegend militärisch geleitete wissenschaftliche Mission (Gusterson 2009). Nur als Nebenzweck fanden auch Forschungen für zukünftige zivile Anwendungen der Trägheitsfusion zur Energiegewinnung statt. In jüngerer Zeit wird diese zivile Seite der Forschung stärker betont und die Forschungseinrichtung öffnet sich hin zur Energieforschung. Das französische Pendant zu NIF, der „*Laser Mégajoule*“ (LMJ), hat ebenfalls eine überwiegend militärische Mission.

Die *dual-use* Möglichkeit der Nutzung von experimentellen Einrichtungen der Laserträgheitsfusion und der dazu entwickelten Simulationsmethoden ermöglicht auch bei der Entwicklung einer rein zivilen Anlage eine latente Proliferationsstrategie. Auch Nichtkernwaffenstaaten könnten sich dadurch die Strategie der Kernwaffenstaaten zu Nutze machen, Kernwaffentests in eine virtuelle Umgebung zu verlagern und damit die Einschränkungen zur Entwicklung bzw. Weiterentwicklung von Kernwaffen durch den umfassenden Teststoppverbotsvertrag zu umgehen (vertikale Proliferation).

Bei der Entwicklung der Trägheitsfusion sollte daher die mögliche Abgrenzung einer zivilen von einer militärischen Nutzung des Know-Hows (experimentelle Daten, Simulationsmethoden) genauer spezifiziert werden, um Einschätzungen der Ausrichtung von Fusionsprogrammen zu erleichtern.

2.4 Stand der Regulierung

Jeder Regulierungsansatz für zukünftige Fusionskraftwerke wird dem Zielkonflikt zwischen Innovation und Sicherheit gerecht werden müssen. Ein Regelwerk muss den Bau, Betrieb, die Stilllegung und den Abbau von Fusionskraftwerken abdecken. In Deutschland werden dafür aktuell eine Anpassung des Strahlenschutzgesetzes, des Atomgesetzes und ein eigenständiges Fusionsgesetz diskutiert.

Fusionsforschungsanlagen in Deutschland wie Wendelstein 7-X sind aufgrund ihres radiologischen Gefährdungspotentials nach Strahlenschutzrecht genehmigt. Seit einigen Jahren gibt es dazu Studien und Empfehlungen, ob und wie die aktuelle Gesetzgebung für mögliche künftige Fusionskraftwerke angepasst werden müsste, bzw. ob es einen eigenständigen Rechtsrahmen bräuchte. Dazu gab und gibt es Aktivitäten sowohl in Deutschland (GRS 2023) als auch auf EU-Ebene (European Commission 2021) und in anderen Ländern. In UK (Department for Business, Energy and Industry Strategy 2022) und den USA (NRC 2023; 2022) gab es erste Entscheidungen,

wie mögliche künftige Fusionskraftwerke reguliert werden sollen. Demnach werden sie in beiden Ländern nicht unter dem jeweiligen Atomrecht behandelt werden. In (Elbez-Uzan et al. 2024) wurden 12 Empfehlungen für die zukünftige Regulierung von Fusionskraftwerken entwickelt. Da Regulierungsrahmen auf jeweils nationaler Gesetzgebung beruhen, ist es nicht zu erwarten, dass es zu einem international verbindlichen Rahmen kommen wird. Ähnlich wie für Atomkraftwerke könnten Ansätze jedoch durch die Übertragung bzw. Entwicklung internationaler Sicherheitsstandards, etwa durch die IAEA, harmonisiert werden.

2.4.1 Sicherheit

Regelwerke legen einerseits grundlegende Anforderungen fest (zielorientierte Regelwerke), geben jedoch auch konkrete technische Ausführungen vor bzw. stellen Anforderungen mit Bezug auf konkrete technologische Lösungen (präskriptive Regelwerke). Eine Frage ist, ob für die Fusion ein präskriptiver Ansatz oder ein stärker zielorientierter Ansatz gewählt wird. Demnach würden entweder konkrete technische Vorgaben gemacht oder allgemein Schutzziele definiert, die erreicht werden müssen, jedoch ohne zu spezifizieren, wie diese erreicht werden. Ein zielorientierter Ansatz bietet den Vorteil, dass er für verschiedene Fusionstechnologien anwendbar sein sollte und nicht zum Beispiel für unterschiedliche Verfahren separat formuliert werden muss. Allerdings besteht hierdurch für die Entwickler die Notwendigkeit, die Einhaltung der zielorientierten Anforderungen für ihr jeweiliges System nachzuweisen, ohne dass sie hierzu auf bereits etablierte Vorgehensweisen zurückgreifen können. Gleichzeitig ergibt sich für die Genehmigungsbehörde die Notwendigkeit, die von den Entwicklern vorgelegten systemspezifischen Nachweise unabhängig zu überprüfen, was wiederum den Aufbau einer entsprechenden Kompetenz und ein klares Wissen über die relevanten Sicherheitsfragen bei den Behörden voraussetzt.

In (GRS 2023) werden sicherheitstechnische Fragestellungen zu Fusionskraftwerken untersucht. Dabei wird auch auf Ansätze für Regelwerke international eingegangen, basierend auf (European Commission 2021). (GRS 2023) stellen etwa fest, dass auch für Fusionskraftwerke, ähnlich wie für Kernkraftwerke, gestaffelte Sicherheitsebenen sinnvoll sind, um Störfälle zu vermeiden bzw. deren Auswirkungen zu begrenzen. Allerdings werden sich sowohl die Prozesse als auch das radiologische Inventar von Fusionskraftwerken von dem von Atomkraftwerken deutlich unterscheiden, sodass die Sicherheitskonzepte für Fusionsanlagen angepasst werden müssten. So kann es in einem Fusionskraftwerk zum Beispiel nicht zu einer unkontrollierten Kettenreaktion kommen wie in einem Atomkraftwerk. Andererseits werden Fusionskraftwerke spezifische Herausforderungen mit sich bringen, die es in Atomkraftwerken so nicht gibt, wie etwa die starken Magnetfelder in Tokamaks und Stellaratoren und damit auch die in den Magnetsystemen gespeicherte Energie. Die Auslegungsstörfälle von Fusionskraftwerken werden sich somit von denen von Atomkraftwerken unterscheiden. Insgesamt ist allerdings das radioaktive Inventar eines Fusionsreaktors wesentlich geringer, wodurch Fusionskraftwerke im Vergleich zu Atomkraftwerken eine deutlich geringeres Risikopotential durch schwere Unfälle haben.

2.4.2 Nichtverbreitung

Die Problematik von *dual-use* Technologien sowie die Notwendigkeit zu Überwachungsmaßnahmen von Fusionskraftwerken durch die IAEA wurde bereits ausführlich weiter oben besprochen (siehe 2.3). Eine entsprechende Entwicklung von Regelwerken sowie ihre internationale Umsetzung stehen aus.

2.4.3 Entsorgung

Wie oben besprochen, werden in möglichen Fusionskraftwerken große Mengen schwach- und mittelradioaktiver Abfälle anfallen. Diese können in Abhängigkeit ihrer (spezifischen) Aktivitäten der gleichen Klassifizierung untergeordnet werden wie dies bei Abfällen aus Atomkraftwerken oder Forschungsanlagen der Fall ist. Dabei wird davon ausgegangen, dass bei Prototypen wie dem europäischen DEMO-Projekt nur schwach- und mittelradioaktive Abfälle anfallen und große Anteile des Abfalls direkt freigegeben werden können (Caruso et al. 2022). Abfälle, die entsorgt werden müssen, sollen nach den jeweiligen nationalen Regelungen konditioniert und verpackt werden.

In (CORWM 2021) wird ausführlich beschrieben, wie in UK mit den aus möglichen Fusionskraftwerken anfallenden radioaktiven Abfällen umgegangen werden könnte und wie der bestehende regulatorische Rahmen angepasst werden müsste. Darin wird auch betont, dass möglichst durch Design und Materialauswahl Aktivierung von Bauteilen vermieden werden sollte. Zusätzlich wird dort empfohlen, eine Abfallmanagementstrategie zu entwickeln, Mengen und Arten von Abfall sowie Lagerungs-/Entsorgungskapazitäten abzuschätzen und die zu erwartenden Kosten einzuplanen.

In Deutschland ist mit Schacht Konrad zurzeit ein Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle im Bau. Dieses ist für etwa 300.000 m³ Abfälle konzipiert (GRS 2023). Durch mögliche Kernfusionskraftwerke entstehende zusätzliche Abfallmengen sind dabei nicht eingeplant, sodass womöglich ein weiteres Endlager nötig würde. Zusätzlich würden für Jahrzehnte große Zwischenlagerkapazitäten benötigt werden.

2.5 Potentielle Rolle von Kernfusionskraftwerken in einem zukünftigen Stromsystem

In vielen Szenarien zum deutschen Energiebedarf wird der Strombedarf bis 2050 stark steigen, getrieben durch die Elektrifizierung vieler Prozesse in verschiedenen Sektoren (ISE 2021). Um somit, wie in Deutschland gesetzlich verankert, bis 2045 Treibhausgasneutralität zu erreichen und zu erhalten, muss in den nächsten Jahren unter anderem auf CO₂-armen Strom umgestellt werden. Dies wird aktuell mit einem starken Ausbau von Windkraft und Photovoltaik vorangetrieben.

In einigen Publikationen wird Kernfusion als potentielle Kandidatin gehandelt, um eben diesen steigenden Strombedarf CO₂-neutral zu decken. Erneuerbare Energien könnten dies allein nicht leisten, da Wind und Sonne volatil und somit nicht zuverlässig seien (BMBF 2024). Als weiterer Vorteil neben der CO₂-Neutralität werden auch die Zuverlässigkeit als Grundlastanlagen und die Bezahlbarkeit von Strom aus Fusionskraftwerken angeführt (BMBF 2024; FIA 2023).

Schaut man Prognosen an, wie ein zukünftiger Strombedarf gedeckt werden kann, scheint es zwei Ausrichtungen zu geben:

1. Der Strombedarf wird in einem zukünftigen System komplett durch erneuerbare Energien und Speicherkapazitäten gedeckt. Ein auf erneuerbare Energien umgestelltes Stromsystem ist unverträglich mit Grundlastkapazitäten:
 - In (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE 2020) wird dargelegt, dass es in einem auf erneuerbare Energien umgestellten Stromnetz keinen Bedarf mehr an Grundlastkraftwerken wie es sie heute gibt, geben wird. Durch Flexibilisierung und

diverse Speicherkapazitäten können Zeiträume mit einer geringen Verfügbarkeit von Wind und Photovoltaik ausgeglichen werden.

- (Präger et al. 2024) diskutieren, ob Atomkraft grundsätzlich geeignet ist als Mittel zum Klimaschutz. Eines der Argumente für Atomkraft in Zukunft ist auch die Grundlastfähigkeit, ähnlich wie für Kernfusion argumentiert wird. (Präger et al. 2024) kommen zu dem Schluss, dass in einem auf erneuerbare Energien aufbauenden Energiesystem kein Bedarf an Grundlastkraftwerken ist und Atomkraftwerke schwer mit der Transformation hin zu erneuerbaren Energien in Einklang zu bringen sind. Dieses Argument lässt sich teilweise auf Fusionskraftwerke übertragen: auch wenn diese leichter regelbar wären als Atomkraftwerke, müssten sie vermutlich schon aus ökonomischen Gründen eine hohe Auslastung aufbringen. In solchen Szenarien ist möglicherweise eine Abregelung entweder von Wind- und Solarenergie oder von Fusionskraftwerken erforderlich, wodurch diese nicht ihr wirtschaftliches Potential ausschöpfen könnten.
2. Es wird auch in Zukunft einen Bedarf für Grundlastkapazitäten geben, die in ein auf erneuerbare Energien umgestelltes Netz integriert werden:
- (Nicholas et al. 2021) untersuchen unter der Annahme von 6 Prämissen, welche Rolle Kernfusionskraftwerke in einem von erneuerbaren Energien dominierten Energiemix spielen könnten. Die Forschungsgruppe geht davon aus, dass plasmaphysikalische und materialwissenschaftliche Herausforderungen wie sie oben diskutiert wurden, gelöst sind. Um bis spätestens 2050 Treibhausgasneutralität zu erreichen, nehmen sie außerdem an, dass Stromnetze ohne Kernfusion auf Treibhausgasneutralität umgestellt wurden und erneuerbare Energien den Energiemix dominieren. Die Forschungsgruppe stellt einige Parallelen zwischen Kernspaltungs- und Kernfusionskraftwerken her: hohe Investitionskosten, hohe Sicherheitsstandards, notwendiger Rückbau und Management von radioaktiven Abfällen. Sie schlussfolgern, dass Fusion in einem dekarbonisierten Energiemarkt eine relevante Rolle spielen könnte, falls erneuerbare Energien und Speicherkapazitäten nicht ausreichen oder eine Grundlastbereitstellung nötig sei. Alternativ könnte Kernfusion eine Nischenfunktion für Industrie- oder Nahwärme einnehmen oder sich auch nie als Technologie durchsetzen.
 - In (Lerede et al. 2023) wird die mögliche Rolle von Fusion in einem zukünftigen Energiesystem untersucht. Dabei greifen sie auf verschiedene Reaktorkonzepte basierend auf Magnetfusion und historische Wachstumskurven zurück. Selbst in einem optimistischen Szenario spielt Kernfusion keine relevante Rolle für die Dekarbonisierung vor 2050.

Zwar haben Fusionskraftwerke im Vergleich zu Atomkraftwerken eine deutlich geringeres Risikopotential. Allerdings gleichen sich die Energietechnologien dahingehend, dass beide extrem komplexe Großanlagen erfordern mit entsprechenden Nachteilen in einem Energiemarkt, der von erneuerbaren Energieträgern dominiert wird. Dies sind z.B. eine geringe Resilienz bei Ausfall der Anlage sowie ein hoher Bedarf an hochspezialisierten Fachkräften und Zulieferertechnologien mit entsprechendem Ausbildungs- und Infrastrukturbedarf.

Die Rolle der Kernfusion in einem zukünftigen Energiemarkt im Jahr 2050 ist heute noch unklar. Die Kompatibilität von Fusionskraftwerken mit einem zukünftigen Energiesystem mit einem hohen Anteil

an erneuerbaren Energiequellen ist zu klären. Nach heutigem Stand können die Potentiale der Fusion für einen nennenswerten Beitrag zur Erreichung von Klimazielen aber erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts zum Tragen kommen (siehe auch 2.1.3).

Literaturverzeichnis

- Bailey, G. W.; Vilkhivskaya, O. V.; Gilbert, M. R. (2021): Waste expectations of fusion steels under current waste repository criteria. In: *Nuclear Fusion* 61 (3), S. 36010. DOI: 10.1088/1741-4326/abc933.
- Batani D, Colaitis A, Consoli F, et al. (2023): Future for inertial-fusion energy in Europe: a roadmap. In: *High Power Laser Science and Engineering* (11). Online verfügbar unter <https://www.cambridge.org/core/journals/high-power-laser-science-and-engineering/article/future-for-inertialfusion-energy-in-europe-a-roadmap/CA1BC0917BDCF29906B9D30799D945E9>.
- BMBF - Bundesministerium für Bildung und Forschung (2023a): Haefner, L.; Neil, A.; Betti, R.; Hurricane, O.; Ma, T.; Stieglitz, R.; Zohm, H. Memorandum Laser Inertial Fusion Energy, BMBF-Expertenkommission zur laserbasierten Trägheitsfusion, vertreten durch ihren Sprecher Prof. Dr. Constantin Leon Häfner.
- BMBF (Hg.) (2023b). Positionspapier Fusionsforschung, Auf dem Weg zur Energieversorgung von morgen. Bundesministerium für Bildung und Forschung.
- BMBF (Hg.) (2024). Förderprogramm Fusion 2040, Forschung auf dem Weg zum Fusionskraftwerk. Bundesministerium für Bildung und Forschung, zuletzt geprüft am 22.04.2024.
- Caruso, G.; Ciattaglia, S.; Colling, B.; Di Pace, L.; Dongiovanni, D. N.; D'Onorio, M.; Garcia, M.; Jin, X. Z.; Johnston, J.; Leichte, D.; Pinna, T.; Porfiri, M. T.; Raskob, W. et al. (2022): DEMO – The main achievements of the Pre – Concept phase of the safety and environmental work package and the development of the GSSR. In: *Fusion Engineering and Design* 176, S. 113025. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2022.113025.
- Chapman, I. T.; Walkden, N. R. (2020): An overview of shared technical challenges for magnetic and inertial fusion power plant development. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 379 (2189), S. 20200019. DOI: 10.1098/rsta.2020.0019.
- CORWM (Hg.) (2021). Radioactive wastes from fusion energy: CoRWM preliminary position paper. Committee on Radioactive Waste Management. Online verfügbar unter <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/61ae4caa8fa8f503780c1ce9/radioactive-wastes-from-fusion-energy-corwm3735-preliminary-paper.pdf>, zuletzt geprüft am 06.08.2024.
- Department for Business, Energy and Industry Strategy (Hg.) (2022). Towards Fusion Energy, The UK Government's response to the consultation on its proposals for a regulatory framework for fusion energy (UK Parliament Command Paper, session 2022/23). [London].
- Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina (2023): Kernfusion: eine Option für Energiesicherheit und Klimaschutz in Deutschland? Unter Mitarbeit von MyCoRe Community; Anton, C.; Artmann, S. und Schmoldt, J.
- Diesendorf, M.; Roser, D.; Washington, H. (2023): Analyzing the Nuclear Weapons Proliferation Risk Posed by a Mature Fusion Technology and Economy. In: *Energies* 16 (3), S. 1123. DOI: 10.3390/en16031123.
- Ditmire, T.; Roth, M.; Patel, P. K.; Callahan, D.; Cheriaux, G.; Gibbon, P.; Hammond, D.; Hannasch, A.; Jarrott, L. C.; Schaumann, G.; Theobald, W.; Therrot, C.; Turianska, O. et al.

- (2023): Focused Energy, A New Approach Towards Inertial Fusion Energy. In: *Journal of Fusion Energy* 42 (2). DOI: 10.1007/s10894-023-00363-x.
- DoE - Department of Energy (2022). Inertial Fusion Energy, Report of the fusion energy sciences workshop on inertial fusion energy. Online verfügbar unter 22. April 2024.
- Edenhofer, O.; Haug, G.; Marotzke, J.; Marquardt, W.; Schlögl, R.; Schmidt, C.; Schüth, F.; Wagner, U. (2023): Den kritischen Zeitpunkt nicht verpassen: Leitideen für die Transformation des Energiesystems (Diskussion, https://levana.leopoldina.org/receive/leopoldina_mods_00035). Online verfügbar unter https://levana.leopoldina.org/receive/leopoldina_mods_00782.
- Elbez-Uzan, J.; Williams, L.; Forbes, S.; Dodaro, A.; Stieglitz, R.; Airila, M. I.; Holden, J.; Rosanvallon, S. (2024): Recommendations for the future regulation of fusion power plants. In: *Nuclear Fusion* 64 (3), S. 37001. DOI: 10.1088/1741-4326/ad13ad.
- ELI ERIC (Hg.) (2023). ELI ERIC Annual Report 2022-2023. Online verfügbar unter https://eli-laser.eu/media/2790/eli_eric_annual_report_2022_2023.pdf.
- Englert, M.; Harrington, A. (2016): Next Generation Nuclear Technologies: New Challenges to the Legal Framework of the IAEA from Intense Neutron Sources. In: Fleck, D. und Black-Branch, J. L. (Hg.): *Nuclear non-proliferation in international law. Volume II: Verification and compliance*. Hague: Asser Press, S. 187–212.
- EU COM (Hg.) (2023). Foresight study on the worldwide developments in advancing fusion energy, including the small scale private initiatives. European Commission, Directorate-General for Energy, Publications Office of the European Union. Online verfügbar unter <https://data.europa.eu/doi/10.2833/967945>.
- EU Kommission (Hg.) (2014). HORIZON 2020 WORK PROGRAMME 2014 – 2015, 19. General Annexes Revised, G: Technology Readiness Level (TRL). Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/research/participants/portal4/doc/call/h2020/common/1617621-part_19_general_annexes_v.2.0_en.pdf, zuletzt geprüft am 29.07.2024.
- EUROfusion (Hg.) (2018). European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy. Online verfügbar unter https://euro-fusion.org/wp-content/uploads/2022/10/2018_Research_roadmap_long_version_01.pdf.
- European Commission (2021). Study on the applicability of the regulatory framework for nuclear facilities to fusion facilities: towards a specific regulatory framework for fusion facilities : final report, European Commission. Directorate General for Energy.; GRS.; KIT.
- FIA (Hg.) (2023). The global fusion industry in 2023, Fusion Companies Survey by the Fusion Industry Association. Fusion Industry Association.
- Franceschini, G.; Englert, M. (2013): Safeguarding fusion reactors, Plädoyer für eine proliferationsresistente Gestaltung der Kernfusion (HSFK-Report, 2013,7). Frankfurt am Main: Hessische Stiftung Friedens- und Konfliktforschung. Online verfügbar unter <https://www.hsfk.de/publikationen/publikationssuche/publikation/safeguarding-fusion-reactors/>.
- Franceschini, G.; Englert, M.; Liebert, W. (2013): Nuclear Fusion Power for Weapons Purposes. In: *The Nonproliferation Review* 20 (3), S. 525–544. DOI: 10.1080/10736700.2013.852876.
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Hg.) (2020): Philip Sterchele; Julian Brandes; Judith Heilig; Daniel Wrede; Christoph Kost; Thomas Schlegel; Andreas Bett; Hans-Martin Henning. Studie: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen.

- GAO (Hg.) (2023). Fusion Energy: Potentially Transformative Technology Still Faces Fundamental Challenges. U.S. Government Accountability Office. Online verfügbar unter <https://www.gao.gov/assets/gao-23-105813.pdf>, zuletzt geprüft am 29.07.2024.
- Gast, R. (28.12.2023): "Die Bedingungen ähneln denen bei der Zündung von Nuklearwaffen", Die Kernfusion verspricht billigen und immer verfügbaren Strom. Aber stimmt das wirklich? Eine führende Forscherin erklärt die Roadmap zum ersten Fusionskraftwerk. In: *Die Zeit*, 28.12.2023. Online verfügbar unter <https://www.zeit.de/wissen/2023-11/tammy-ma-kernfusion-physik-strom-klima/komplettansicht>, zuletzt geprüft am 22.04.2024.
- Glaser, A.; Goldston, R. J. (2012): Proliferation risks of magnetic fusion energy: clandestine production, covert production and breakout. In: *Nucl. Fusion* 52 (4), S. 43004. DOI: 10.1088/0029-5515/52/4/043004.
- Gonzalez de Vicente, S. M.; Smith, N. A.; El-Guebaly, L.; Ciattaglia, S.; Di Pace, L.; Gilbert, M.; Mandoki, R.; Rosanvallon, S.; Someya, Y.; Tobita, K.; Torcy, D. (2022): Overview on the management of radioactive waste from fusion facilities: ITER, demonstration machines and power plants. In: *Nuclear Fusion* 62 (8), S. 85001. DOI: 10.1088/1741-4326/ac62f7.
- GRS - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (2023): Kowalik, M.; Thuma, G. Verfolgung sicherheitstechnischer Fragestellungen von Fusionsanlagen zur Erzeugung elektrischer Energie (GRS-724). Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig.
- Gusterson, H. (2009): Why Thomas Friedman Is Wrong about the National Ignition Facility. In: *Bulletin of the Atomic Scientists*. Online verfügbar unter <https://thebulletin.org/2009/04/why-thomas-friedman-is-wrong-about-the-national-ignition-facility/>.
- Häfner et al. (2022): Status and Perspectives of High-Power Pump Diodes for Inertial Fusion Energy Lasers, A white paper prepared for the IFE Science & Technology Community Strategic Planning Workshop 2022. Unter Mitarbeit von Carlo Holly, Hans-Dieter Hoffmann, Lukas Gruber, Mark Crowley, Lawrence Woods, Robert Walker, Prabhu Thiagarajan, Stewart McDougall, Konstantin Boucke, Keeley Hurley, Guoli Lui, Juergen Jandeleit, Alex Zeitsche, Ralf Hülsewede, Robert J. Deri. Online verfügbar unter <https://lasers.llnl.gov/sites/lasers/files/2023-11/haefner-ILT-IFE-workshop-2022-1.pdf>.
- Helmholtz Task Force "Laserbasierte Fusionsforschung" (Hg.) (2023): W. Leemans, V. Bagnoud, I. Bohnet, S. Günter, A. Lambrecht, U. Schramm, R. Stieglitz, T. Stöhlker. The Fusion Energy Options, Discussion paper of the Helmholtz Task Force „Laserbasierte Fusionsforschung“. Online verfügbar unter https://www.helmholtz.de/assets/helmholtz_gemeinschaft/Standpunkte/Discussion_Paper_AG_Laser.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2024.
- HiPER: European High Power Laser Energy Research Facility (Preparatory Phase Study) HiPER (Hg.). Online verfügbar unter <https://cordis.europa.eu/project/id/211737/de>.
- IAEA - International Atomic Energy Agency (2023). IAEA World Fusion Outlook 2023, Fusion Energy: Present and Future, zuletzt geprüft am 22.04.2023.
- IAEA (2013). Report of the consultancy meeting on "Non-Proliferation Challenges in Connection with Magnetic Fusion Power Plants", IAEA Headquarters, Vienna, 26 – 28 June 2013. Online verfügbar unter https://www.prif.org/fileadmin/HSFK/hsfk_downloads/Consultancy_Fusion_Non-Proliferation_Report_Final.pdf, zuletzt geprüft am 28.02.2024.
- IAEA (Hg.) (2024). Considerations of Technology Readiness Levels for Fusion Technology Components, IAEA-TECDOC-2047.

- IFMIF-DONES España (Hg.) (2023). 2023 Annual Report. Online verfügbar unter <https://ifmif-dones.es/wp-content/uploads/2024/07/Memoria-IFMIF-DONES-2023.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2024.
- IPFM - International Panel on Fissile Materials (2024): France to produce tritium for nuclear weapons in EDF civilian nuclear reactors, International Panel on Fissile Materials. Online verfügbar unter https://fissilematerials.org/blog/2024/03/france_to_produce_tritium.html, zuletzt geprüft am 11.11.2024.
- ISE (Hg.) (2021): ISE, F. Studie: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Update Klimaneutralität 2045, Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem-Update-Klimaneutralitaet-2045.pdf>.
- ITER (20.06.2024): Pressemitteilung: 34th ITER Council Meeting: Updated baseline proposal presented to Council for further evaluation. ST PAUL-LEZ-DURANCE, France. Online verfügbar unter https://www.iter.org/doc/www/content/com/Lists/list_items/Attachments/1194/2024_06_IC-34.pdf, zuletzt geprüft am 29.07.24.
- Kalinowski, M. (2004): International control of tritium for nuclear nonproliferation and disarmament (Science and global security monograph series, v. 4). Boca Raton: CRC Press. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=200388>.
- Kalinowski, M. B. (1993): Uncertainty and range of alternatives in estimating tritium emissions from proposed fusion power reactors and their radiological impact. In: *J Fusion Energ* 12 (1-2), S. 157–161. DOI: 10.1007/BF01059372.
- Kalinowski, M. B.; Colschen, L. C. (1995): International control of tritium to prevent horizontal proliferation and to foster nuclear disarmament. In: *Science & Global Security* 5 (2), S. 131–203. DOI: 10.1080/08929889508426422.
- Kovari, M.; Coleman, M.; Cristescu, I.; Smith, R. (2017): Tritium resources available for fusion reactors. In: *Nuclear Fusion* 58 (2), S. 26010. DOI: 10.1088/1741-4326/aa9d25.
- L. El-Guebaly et al. (2017): Integral Management Strategy for Fusion Radwaste: Avoiding Geologic Disposal Through Recycling and Clearance. Online verfügbar unter https://burningplasma.org/activities/uploads_tec/El-Guebaly_FESAC_TEC2017_White_Paper.pdf, zuletzt geprüft am 05.08.2024.
- Lerede, D.; Nicoli, M.; Savoldi, L.; Trotta, A. (2023): Analysis of the possible contribution of different nuclear fusion technologies to the global energy transition. In: *Energy Strategy Reviews* 49, S. 101144. DOI: 10.1016/j.esr.2023.101144.
- LLNL 2024: Achieving Fusion Ignition. Online verfügbar unter <https://lasers.llnl.gov/science/achieving-fusion-ignition>, zuletzt geprüft am 08.08.2024.
- Mankins, J. C. (2009): Technology readiness assessments: A retrospective. In: *Acta Astronautica* (65, Ausgabe 9-10), S. 1216–1223. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0094576509002008>.
- Meier, W. R.; Dunne, A. M.; Kramer, K. J.; Reyes, S.; Anklam, T. M. (2014): Fusion technology aspects of laser inertial fusion energy (LIFE). In: *Fusion Engineering and Design* 89 (9), S. 2489–2492. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2013.12.021.
- Merian, A. (2023): Brennpunkte der Kernfusion, Max-Planck-Gesellschaft. Online verfügbar unter <https://www.mpg.de/19734973/brennpunkte-der-kernfusion>, zuletzt geprüft am 22.04.2024.

- Meschini, S., Laviano, F., Ledda, F., Pettinari, D., Testoni, R., Torsello, D., Panella, B. (2023): Review of commercial nuclear fusion projects. In: *Frontiers in Energy Research*. Online verfügbar unter <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2023.1157394/full#>.
- Ni, M.; Wang, Y.; Yuan, B.; Jiang, J.; Wu, Y. (2013): Tritium supply assessment for ITER and DEMOnstration power plant. In: *Fusion Engineering and Design* 88 (9-10), S. 2422–2426. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2013.05.043.
- Nicholas, T.; Davis, T. P.; Federici, F.; Leland, J.; Patel, B. S.; Vincent, C.; Ward, S. H. (2021): Re-examining the role of nuclear fusion in a renewables-based energy mix. In: *Energy Policy* 149, S. 112043. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.112043.
- NRC - Nuclear Regulatory Commission (Hg.) (2022). NRC Staff Prepared White Paper “Licensing and Regulating Fusion Energy Systems” September 2022 Draft – Released to Support ACRS Interaction.
- NRC - Nuclear Regulatory Commission (Hg.) (2023). SRM-SECY-23-0001: Options for Licensing and Regulating Fusion Energy Systems. Online verfügbar unter <https://www.nrc.gov/docs/ML2310/ML23103A449.pdf>.
- Pearson, R. J.; Antoniazzi, A. B.; Nuttall, W. J. (2018): Tritium supply and use: a key issue for the development of nuclear fusion energy. In: *Fusion Engineering and Design* 136, S. 1140–1148. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2018.04.090.
- Präger, F.; Breyer, C.; Fell, H.-J.; Hirschhausen, C. von; Kemfert, C.; Steigerwald, B.; Traber, T.; Wealer, B. (2024): Evaluating nuclear power's suitability for climate change mitigation: technical risks, economic implications and incompatibility with renewable energy systems. In: *Front. Environ. Econ.* 3. DOI: 10.3389/frevc.2024.1242818.