

FIRE – Forschungs- und Innovationsroadmap Fusionsenergie

ZWISCHENERGEBNISSE

Fusionsenergie in Deutschland

Entwicklungspfade zum ersten Fusionskraftwerk

 acatech

DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	3
Zusammenfassung	4
Projekt	8
1. Einleitung und Zielsetzung	12
2. Stand der Fusionsforschung und -technologie	13
2.1 Tokamak: Stand der Technik und zentrale Forschungsprogramme.....	13
2.2 Stellarator: Technologiekonzept und zentrale Forschungsanlagen.....	16
2.3 Laserfusion: Konzepte, Forschungsstand und internationale Entwicklungen.....	18
2.4 Basistechnologien für Fusionsenergie	21
2.5 Überblick über die Technologiereife.....	24
2.6 Internationale Initiativen und Strategien der Fusionsenergie	25
3. Technologische Zwischenziele und Herausforderungen	28
3.1 Magnetfusion	29
3.2 Laserfusion	34
3.3 Materialien und Brennstoff	40
3.4 Kraftwerkstechnologien.....	46
4. Entwicklungspfade und Handlungsoptionen zu einem Fusionskraftwerk	48
4.1. Magnetfusion	49
4.2. Laserfusion	61
4.3. Materialien und Brennstoff	69
4.4. Deutsches Fusionsökosystem	80
5. Fazit und Schlussfolgerungen: Szenarien für ein deutsches Fusionskraftwerk	83
Literaturverzeichnis	90

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Tokamak – schematische Darstellung	14
Abbildung 2: Stellarator – schematische Darstellung.....	17
Abbildung 3: Laserfusion (Direct Drive und Indirect Drive) – schematische Darstellung	19
Abbildung 4: Entwicklungspfad für die Magnetfusion hin zu einem Fusionskraftwerk.	60
Abbildung 5: Entwicklungspfad für die Laserfusion.....	68
Abbildung 6: Entwicklungspfad für Materialien und Brennstoff.....	79
Abbildung 7: Netzplan der notwendigen Zwischenziele.....	84

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick über den Technologiereifegrad (TRL) der wichtigsten Komponenten	25
Tabelle 2: Zusammenfassung der Handlungsoptionen für die Magnetfusion.	51
Tabelle 3: Zusammenfassung der Handlungsoptionen für die Laserfusion.	63
Tabelle 4: Zusammenfassung der Handlungsoptionen für Materialien und Brennstoff.....	71
Tabelle 5: Zusammenfassung der Handlungsempfehlungen.....	87

Zusammenfassung

Die Erschließung der Fusionsenergie birgt das Potenzial einer unerschöpflichen klimaneutralen Energiequelle, die einen wesentlichen Beitrag zur zukünftigen Energieversorgung leisten kann. Auch die Entwicklung der dafür erforderlichen Technologien bietet erhebliche Spillover-Möglichkeiten. Auf dem Weg zu einem funktionstüchtigen Fusionskraftwerk sind aber noch zahlreiche voneinander abhängige **physikalische, technische und organisatorische Herausforderungen** zu bewältigen.

Die vorliegende **Forschungs- und Innovationsroadmap Fusionsenergie (FIRE)** zeigt konsistente **Entwicklungspfade** hin zu einem ersten deutschen Fusionskraftwerk auf. Die Roadmap identifiziert technische Hürden sowie notwendige Zwischenziele für die Errichtung und den kommerziellen Betrieb eines Fusionskraftwerks. Dabei wird konkret die Frage aufgeworfen, was genau umgesetzt und erreicht werden müsste, um bis 2045 ein erstes Fusionskraftwerk realisieren zu können. Damit liefert sie eine **faktenbasierte Entscheidungsgrundlage** für politische Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger zur **Priorisierung öffentlicher Investitionen**, ohne Top-down-Vorgaben zu machen oder konkrete Handlungsanweisungen zu geben.

Dieser Analyse zufolge wird die **Inbetriebnahme eines Fusionskraftwerks bis 2045** nur durch eine massive Beschleunigung der Umsetzung der Entwicklungsschritte und Bündelung von Ressourcen möglich. Die Errichtung von **Neutronenquellen**, die Entwicklung von **Brut-Blankets** und die **Hochskalierung** der Komponentenfertigung erweisen sich dabei als besonders kritische Engpässe. Sollten diese Grundbedingungen nicht zeitnah erfüllt werden, ist mit Verzögerungen von mindestens **5 bis 10 Jahren** zu rechnen.

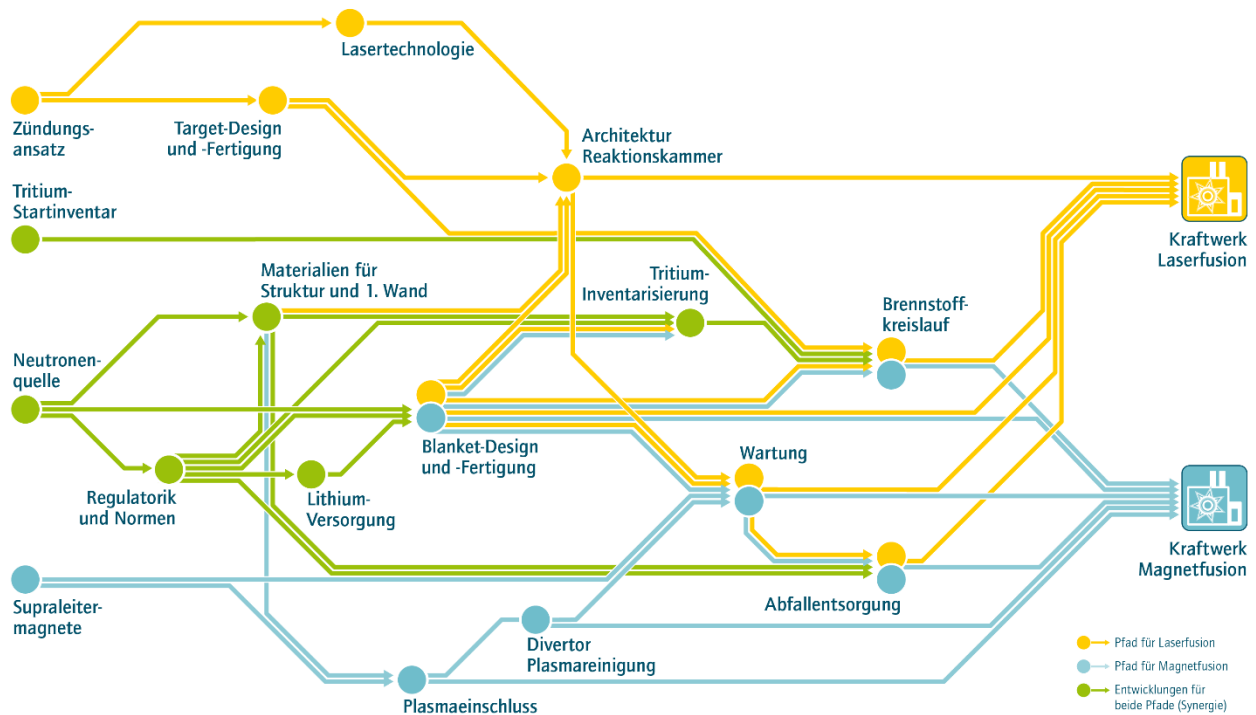
Die verschiedenen Fusionsansätze sind jeweils mit **spezifischen technologischen Herausforderungen** verbunden: Beim **Tokamak** können beispielsweise Plasmadisruptionen den Kraftwerksbetrieb unmöglich machen, während beim **Stellarator** Fragen zum stabilen Plasmaeinschluss im Vordergrund stehen. Die **Laserfusion** erfordert Fortschritte bei der Entwicklung zentraler Komponenten, konkret bei den Lasersystemen und Targets. Fortschritte bei **Materialien und Brennstoff**, die die Basistechnologien für die Fusionsenergie umfassen, spielen eine zentrale Rolle für den erfolgreichen Betrieb eines Fusionskraftwerks. Materialien müssen extremen Belastungen aus Wärme und Neutronenbestrahlung standhalten, während Technologien zur Tritium-Versorgung und zum Brennstoffkreislauf die Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit von Tritium sicherstellen. Die parallele Entwicklung dieser Querschnittstechnologien ist entscheidend, um spätere Engpässe zu vermeiden und Fortschritt zu ermöglichen.

Die Bewältigung dieser Herausforderungen stellt einen langfristigen, komplexen Prozess dar, der klare Zwischenziele verlangt. Von einem funktionstüchtigen **Kraftwerk aus rückwärts planend**, lassen sich notwendige Zwischenziele identifizieren und entsprechende Zeitabschätzungen formulieren.

Basierend auf Experteninterviews, Projektgruppensitzungen, thematischen Workshops und einer Literaturschau wurden für die Roadmap relevante Zwischenziele identifiziert und in entsprechende technologische Entwicklungspfade unterteilt. Konkret wurden **drei Entwicklungspfade** ausgearbeitet: Magnetfusion, Laserfusion sowie Materialien und Brennstoff. Mit der FIRE-Roadmap liegt somit ein wissenschaftlich fundierter und breit abgestimmter **Fahrplan** vor, der Prioritäten identifiziert und Entscheidungen auf einer soliden Grundlage ermöglicht.

Betrachtet man die drei Entwicklungspfade und die darin enthaltenen Zwischenziele, die auf dem Weg zu

einem Fusionskraftwerk realisiert werden müssen, ergibt sich ein **Netzplan**, der die notwendigen Entwicklungsschritte komprimiert darstellt. Daneben werden durch die Abfolge des Netzplans auch die vorliegenden Abhängigkeiten zwischen den Entwicklungspfaden abgebildet.



Der Netzplan bildet notwendige Zwischenziele für den Laserfusionspfad (gelb) und den Magnetfusionspfad (blau) sowie solche Ziele ab, die beide Pfade synergetisch vorantreiben (grün). Jeder Pfeil visualisiert die Abhängigkeiten zwischen Zielen hin zu einem Fusionskraftwerk: Jedes kann erst geklärt werden, nachdem die damit in Verbindung stehenden Ziele abgeschlossen wurden (Quelle: eigene Darstellung).

Dieser Fahrplan zeigt transparent auf, welche Zwischenziele für den Weg zum Fusionskraftwerk notwendig sind und wo sowohl Abhängigkeiten als auch Potenziale für Synergien zwischen den Entwicklungspfaden bestehen.

Den Entwicklungspfaden geht jeweils eine **Beschreibung von Handlungsoptionen und Szenarien** voraus. Die Analyse zeigt, dass **Geschwindigkeit**, verfügbare **Ressourcen** und einzugehende **Risiken** die Schlüsselkriterien für die Festlegung einer Umsetzungsstrategie sind. Anhand dieser Faktoren lassen sich die verschiedenen Optionen bewerten.

Aus der Beschreibung der Handlungsoptionen gehen **drei „No-regret-Maßnahmen“** hervor, die für die Entwicklung zu einem Fusionskraftwerk priorisiert umgesetzt werden sollten: der Ausbau von **Neutronentestinfrastrukturen**, die konsequente Weiterentwicklung des **Stellarator-Ansatzes** (bei Verwertung der Forschungsergebnisse des Tokamaks) sowie die Priorisierung der Entwicklung der **Lasertechnologie**. Diese priorisierten Maßnahmen etablieren einen entschlossenen Fortschritt an strategisch wichtigen Stellen als Ausgangspunkt für die Entwicklungspfade.

Neben technologischen Entwicklungen ist die ganzheitliche Betrachtung von Bedarfen für ein leistungsfähiges **deutsches Fusionsökosystem** unabdingbar. Dazu gehören klare regulatorische Rahmenbedingungen, die Berücksichtigung der Systemintegration von Beginn an, industrielle Kapazitäten, die Sicherung von

Fachkräften sowie geeignete Kooperationsstrukturen zwischen Staat, Wissenschaft und Wirtschaft. Werden nicht frühzeitig **geeignete Rahmenbedingungen** geschaffen, besteht das Risiko, dass Know-how, Wertschöpfung und industrielle Umsetzungspotenziale ins Ausland abwandern.

Auf politischer Ebene ergeben sich bei der Festlegung der **Umsetzungsdynamik** wichtige Entscheidungsbedarfe, die für das Ziel eines ersten deutschen Fusionskraftwerks relevant sind. Die Umsetzungsdynamik wird von der **Ressourcenverfügbarkeit**, der **Geschwindigkeit** und dem **Risiko** geprägt. Insgesamt identifiziert die Roadmap drei Szenarien, welche die politische Ebene als Entscheidungsgrundlage zur Bestimmung der Umsetzungsdynamik heranziehen kann:

Ein erstes Szenario priorisiert die schnelle Zielerreichung anhand paralleler wettbewerblicher Entwicklungen. Dieses Vorgehen erfordert hohe finanzielle Mittel und organisatorischen Aufwand, reduziert jedoch strategische Risiken durch frühzeitige Identifikation robuster Lösungen. Technologische Unsicherheiten bleiben indes hoch, da viele Ansätze noch unzureichend wissenschaftlich validiert sind.

Ein zweites Szenario legt den Fokus auf Risikominderung durch sorgfältige Grundlagenforschung, die die Basis für weitere Schritte darstellt. Konkret werden erst bei der Erzielung wissenschaftlicher Erkenntnisgewinne weitere Maßnahmen entschieden. Lediglich die finalen Maßnahmen im Rahmen der Kraftwerksrealisierung werden in einem wettbewerblichen Rahmen umgesetzt. Durch dieses Vorgehen lassen sich Risiken beim Kraftwerksbau reduzieren; gleichzeitig geht damit jedoch ein erhöhter Zeitaufwand einher, was dazu führen kann, dass Marktpotenziale nicht erschlossen werden können.

Ein drittes Szenario kombiniert kooperative Grundlagenforschung mit wettbewerblichen Programmen. Der Aufbau einer öffentlichen Forschungsinfrastruktur legt die Grundlage für die wettbewerbliche Entwicklung von Teiltechnologien durch industrielle Konsortien. Dieser Ansatz liegt hinsichtlich Geschwindigkeit, Risiko und Ressourcennutzung zwischen erstem und zweitem Szenario. Ziel ist ein ausgewogenes Ökosystem, das Risiken verteilt, Zusammenarbeit zwischen Fusionsunternehmen, Forschungseinrichtungen, der Zulieferindustrie und Kraftwerksbauern stärkt sowie die Dominanz einzelner Akteure verhindert.

Die Kernbotschaften für Deutschlands Weg zu einem funktionstüchtigen Fusionskraftwerk sind folgende:

- 1) Deutschland als Vorreiter der Fusionsenergie:** Deutschland hat mit führenden Forschungsinstituten, dynamischen Fusionsunternehmen und einer leistungsfähigen Industrie eine sehr gute Ausgangsbasis für erfolgreiche Innovationen in der Fusionsenergie mit hohem wirtschaftlichem Potenzial. Außerdem verfügt Deutschland über ein starkes akademisches Ökosystem zur Ausbildung hochqualifizierter Fachkräfte und Sicherung der wissenschaftlichen Grundlagen.
- 2) Der Bau eines funktionstüchtigen Fusionskraftwerks in Deutschland verlangt allen Akteuren im Fusionsökosystem große Kraftanstrengungen ab:** Es bedarf einer massiven Beschleunigung bei der Umsetzung der erforderlichen Maßnahmen, um bis 2045 ein funktionstüchtiges Fusionskraftwerk in Betrieb nehmen zu können. Jeder Entwicklungspfad mit dem Ziel, ein Fusionskraftwerk zu errichten, erfordert die Bewältigung großer technologischer Herausforderungen und birgt unterschiedliche Risiken sowie Chancen.
- 3) „No-regret“-Optionen auf dem Weg zu einem ersten Fusionskraftwerk umsetzen:** Es ergeben sich drei klar erkennbare technologische Ansätze: (1) Aufbau der Infrastrukturen für fusionspezifische Neutronentestung und des Brennstoffkreislaufs; (2) Priorisierung des Stellarators in der Magnetfusion;

(3) entschlossene Entwicklung der Lasertechnologie. Diese Ansätze sind mit einem klaren Bekenntnis zur langfristigen Förderung der Fusionsenergie zu realisieren.

- 4) **Strategie zur Umsetzung der Entwicklungsschritte zum Fusionskraftwerk festlegen:** Es können drei Szenarien entlang der Entwicklungsdynamiken abgeleitet werden. Das erste Szenario priorisiert die Umsetzungsgeschwindigkeit, das zweite die Risikominimierung, das dritte den Aufbau eines ausgewogenen Ökosystems. Entlang der gewählten Szenarien ist eine deutliche Beschleunigung der Entwicklungsschritte möglich, sofern substanzielle zusätzliche Ressourcen bereitgestellt und das einzugehende Risiko abgewogen werden. Öffentliche Mittel sind jedoch begrenzt.
- 5) **Systemintegration kontinuierlich berücksichtigen:** Die Systemintegration soll von Beginn an berücksichtigt werden. Zwischenziele werden dabei vom Kraftwerk aus rückwärts geplant. Ein Regulierungsrahmen und die Festlegung des Betreibermodells sind wichtige Leitplanken für ein zielgerichtetes Vorgehen.

Deutschland kann eine führende Rolle bei der Entwicklung und Errichtung des ersten Fusionskraftwerks einnehmen. Um die Weichen für diese Zukunftstechnologie zu stellen, müssen bereits heute Entscheidungen getroffen werden. Diese beziehen sich auf eine strategische Vernetzung zwischen Forschung, Industrie und Fusionsunternehmen sowie die gezielte Nutzung internationaler Partnerschaften. Daneben bedarf es einer langfristigen Umsetzungsstrategie, die erforderliche Ressourcen bündelt, Leitplanken für alle Beteiligten setzt und sich flexibel an neue Entwicklungen anpasst.

Projekt

Projektleitung

Prof. Dr. habil. Claudia Eckert

acatech – Deutsche Akademie der
Technikwissenschaften e. V.

Prof. Dr. Robert Schlögl

Alexander von Humboldt-Stiftung

Inhaltliche Begleitung und Review

Prof. Dr. Dr. Ann-Kristin Achleitner

Technische Universität München

Dr. Tony Donné

EUROfusion (ehem.)

Prof. Dr. Maximilian Fleischer

Siemens Energy AG

Prof. Dr. Sibylle Günter

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP)

Prof. Dr. Constantin Häfner

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten
Forschung e. V.

Dr. Frank H. Laukien

Bruker Corp., Gauss Fusion GmbH

Prof. Dr. Wim Leemans

Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY)

Prof. Dr. Christian Linsmeier

Forschungszentrum Jülich GmbH

Prof. Dr. Wolfram Münch

EnBW AG

Dr. Magnus Schlösser

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Dr. Antonia Schmalz

Bundesagentur für Sprunginnovationen (SPRIND GmbH)

Prof. Dr. Dr. Christoph M. Schmidt

RWI - Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung

Dr. Eberhard von Rottenburg

Bundesverband der Deutschen Industrie e. V.

Dr. Wolfgang Walter

Bilfinger Nuclear & Energy Transition GmbH, Pro-Fusion
e. V.

Prof. Dr.-Ing. Jan Wörner

Frankfurt Institute for Advanced Studies (FIAS)

Dr. Hagen Zimer

TRUMPF SE & Co. KG

Konzeption, Texte und Interviews

Sandra Pavleka	acatech Geschäftsstelle
Dr. Cyril Stephanos	acatech Geschäftsstelle
Dr. Johannes Thiele	acatech Geschäftsstelle
Dr. Karl Wienand	acatech Geschäftsstelle

Redaktionelle Begleitung durch

Maxim Jockwer	acatech Geschäftsstelle
Niklas Koscholleck	acatech Geschäftsstelle
Jördis Lemke	acatech Geschäftsstelle

Förderung

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) gefördert.

Projektlaufzeit

03/2025 – 02/2027

Interviewpartnerinnen und Interviewpartner

Der Inhalt der Publikation spiegelt ausschließlich die Position der Autorinnen und Autoren wider und entspricht nicht notwendigerweise der Meinung der einzelnen befragten Expertinnen und Experten.

Prof. Dr.-Ing. Jarir Aktaa	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Dr. Frédérick Bordry	Gauss Fusion GmbH
Dr. David Campbell	ITER Organization (retired)
Dr. Alexis Casner	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)
Sara Castegini	Commonwealth Fusion Systems (CFS)
Prof. Dr. Ian Chapman	United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA)
Dr. Jan Willem Coenen	Forschungszentrum Jülich GmbH, Gauss Fusion GmbH
Prof. John Collier	Science and Technology Facilities Council (STFC), Central Laser Facility (CLF)
Prof. Gilbert Collins	University of Rochester
Dr.-Ing. Christian Day	Kyoto Fusioneering Ltd.
Prof. Tony Donné	EUROfusion (ehem.)
Michael Ehrmantraut	Marvel Fusion GmbH
Dr. Gianfranco Federici	EUROfusion
Heike Freund	Marvel Fusion GmbH
Jean-Pierre Friconeau	ITER Organization, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)
Conner Galloway	Xcimer Energy Inc.
Dr. Thomas Giegerich	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Dr. Thomas Granzer	Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP)
Dr. Robin Größle	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Prof. Dr. Sibylle Günter	Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP)
Dr. Richard Hawryluk	Princeton Plasma Physics Laboratory (PPPL)
Dr. Klaus Hesch	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Prof. Norbert Holtkamp	Stanford University
Dr. Francisco A. Hernández González	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Dr. Omar Hurricane	Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)
Prof. Dr.-Ing. John Jelonnek	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Dr. Richard Kembleton	Gauss Fusion GmbH (ehem.)
Prof. Dr. Christoph Kirchlechner	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Prof. Dr. Thomas Klinger	Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP)
Dr. Georg Korn	Marvel Fusion GmbH
Günter Kraft	Focused Energy GmbH
Dr. Cord-Henrich Lefhalm	RWE Nuclear GmbH
Dr. Sébastien Le Pape	Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI)
Prof. Dr. Wim Leemans	Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY)
Dr. Tammy Ma	Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)
Dr. Yves Martin	École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Dr. Hans Meister	Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP)
Dr. Thomas Mull	Framatome GmbH (ehem.)
Dr. Bob Mumgaard	Commonwealth Fusion Systems (CFS)
Prof. Peter Norreys	University of Oxford
Prof. Luís O. Silva	Instituto Superior Técnico
Dr. Michael Peiniger	ProZukunft Stiftung gGmbH
Dr. Gerald Pintsuk	Forschungszentrum Jülich GmbH
Dr. Werner Prusseit	THEVA Dünnschichttechnik GmbH
Prof. Dr. Hartmut Ruhl	Marvel Fusion GmbH
Prof. Dr. Markus Roth	Focused Energy GmbH
Dr. Antonia Schmalz	Bundesagentur für Sprunginnovationen (SPRIND) GmbH
Prof. Oliver Schmitz	University of Wisconsin-Madison, Realta Fusion Inc.
Dr. Magnus Schlösser	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Dr. Francesco Sciortino	Proxima Fusion GmbH
Dr. Wayne Solomon	General Atomics
Prof. Dr. Bernhard Unterberg	Forschungszentrum Jülich GmbH
Dr. Wolfgang Walter	Bilfinger Nuclear & Energy Transition GmbH, Pro-Fusion e. V.
Dr. Lutz Wegener	Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP), Proxima Fusion GmbH
Prof. Anne White	Massachusetts Institute of Technology (MIT)
Prof. Dr.-Ing. Jan Wörner	Frankfurt Institute for Advanced Studies (FIAS)
Dr. Andreas Zeiler	Carl Zeiss AG
Prof. Dr. Hartmut Zohm	Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP)

1. Einleitung und Zielsetzung

Fusionsenergie gilt als eine vielversprechende Technologie zur **klimafreundlichen Energiegewinnung**, die in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts ihr volles Potenzial entfalten könnte. Trotz enormer **Fortschritte** in Wissenschaft und Technik sind auf einem möglichen Weg zum Fusionskraftwerk allerdings noch zahlreiche physikalische, technische und organisatorische **Herausforderungen** zu überwinden. Vor diesem Hintergrund ist es erforderlich, eine wissenschaftlich fundierte sowie breit abgestimmte **Forschungs- und Innovationsroadmap Fusionsenergie** zu entwickeln.

Das Ziel der Roadmap besteht darin, mögliche **Wege zu einem ersten deutschen Fusionskraftwerk** aufzuzeigen und eine Faktenbasis bereitzustellen. Damit soll eine Grundlage für nachvollziehbare Priorisierungen **öffentlicher Mittel** geschaffen werden, da diese **begrenzt** sind und gute Entscheidungen eine klare Wissensbasis erfordern.

Die Roadmap ist darüber hinaus ausdrücklich **nicht als Top-down-Ansatz** angelegt und verfolgt nicht das Ziel, einzelne Akteure aus Wissenschaft, Industrie oder Fusionsunternehmen auf konkrete Handlungsschritte festzulegen. Vielmehr werden auf Basis einer **breiten Datensammlung** aus Experteninterviews, Literaturlauswertungen, Projektgruppensitzungen sowie fachlich vertiefenden Workshops konsistente **mögliche Entwicklungspfade** hin zu einem ersten Fusionskraftwerk skizziert.

Die Roadmap beschreibt drei **technologische Pfade** – Magnetfusion, Laserfusion sowie Materialien und Brennstoff –, die Integration in eine Kraftwerksstruktur und den Aufbau eines Ökosystems. Entlang dieser Pfade werden **Handlungsoptionen** entwickelt und auf Basis von Projektgruppensitzungen, Experteninterviews, Literaturlauswertungen sowie Workshops Aussagen zur **zeitlichen Dimension einzelner Entwicklungsschritte** abgeleitet. Ferner wird in Bezug auf zentrale Schlüsselherausforderungen dargestellt, an welchen Stellen **Parallelisierungen** möglich sind und wo ein **sequenzielles Vorgehen** erforderlich bleibt.

Aus den **plausibilisierten Zeitspannen** der einzelnen Entwicklungsschritte wird schließlich eine zeitliche Abschätzung hergeleitet: Diese folgt dem Ansatz, vom **Kraftwerk rückwärts zu denken**, und beschreibt, welche Zwischenziele erreicht werden müssten, um bis zur Mitte des Jahrhunderts ein erstes Fusionskraftwerk in Deutschland realisieren zu können. Dabei wird konkret die Frage aufgeworfen, welche Schritte genau umgesetzt und welche Ziele erreicht werden müssten, um **bis 2045 ein erstes Fusionskraftwerk** errichten zu können.

Im Koalitionsvertrag 2025 wurde das Ziel festgeschrieben, den ersten Fusionsreaktor der Welt in Deutschland zu errichten. Darüber hinaus hat **die Bundesregierung** mit dem Aktionsplan „Deutschland auf dem Weg zum Fusionskraftwerk“ und der Hightech Agenda Deutschland weitere **ambitionierte Zielsetzungen** formuliert.

Der Ansatz der Roadmap ist **technologieoffen** und berücksichtigt die aktuell miteinander konkurrierenden Fusionskonzepte des magnetischen beziehungsweise laserbasierten Trägheitseinschlusses gleichermaßen, mit jeweiligem Blick auf deren Entwicklungsstand, Potenziale und spezifische Herausforderungen. Der **enge Dialog mit relevanten Stakeholdern** stellt sicher, dass eine wissenschaftlich fundierte Roadmap mit breiter fachlicher Akzeptanz entwickelt wird. Zugleich fließen internationale Roadmaps und strategische Programme in die Ausarbeitung mit ein, um globale Entwicklungen und notwendige **internationale Kooperationen** zu erfassen und **nationale Gestaltungsspielräume** einzuordnen.

Für **politische Akteure sowie Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger** werden entlang der aufgezeigten Pfade konkrete **Handlungsoptionen** formuliert. So bietet ihnen diese Roadmap eine wissenschaftlich begründete strategische Orientierung, um die gegenwärtige Dynamik der Fusionsforschung zu stärken, statt sich auf kleinteilige Probleme der technischen Umsetzung zu fokussieren.

Die Roadmap ist dabei nicht als ein statisch abgeschlossenes, sondern als ein **fortlaufendes Dokument** zu verstehen, das die hohe Dynamik im Bereich der Fusionsenergie aufnimmt und entsprechende Handlungsoptionen weiterentwickelt. Die vorliegende Fassung liefert daher **Zwischenergebnisse des laufenden Roadmap-Prozesses**. Sie bildet den derzeitigen Arbeitsstand ab und wird im weiteren Verlauf auf Basis neuer Erkenntnisse fortgeschrieben.

2. Stand der Fusionsforschung und -technologie

Bei einer Fusionsreaktion verschmelzen zwei leichte Atomkerne in einem heißen Plasma zu einem schwereren Kern. Die Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium gelten als gängigster Fusionsbrennstoff für die Energiegewinnung (Yamada, 2025). Denn die Deuterium-Tritium-Fusion erfordert die geringste Temperatur und erreicht gleichzeitig die höchste Reaktionsrate (Peres, 1979). Alternative Brennstoffe – etwa für die sogenannte aneutronische Fusion – sind noch unausgereift und stellen große Herausforderungen dar (Department of Energy Office of Science, 2023); deswegen werden sie in der vorliegenden Ausarbeitung nicht betrachtet.

Tritium hat eine Halbwertszeit von rund zwölf Jahren und kommt in der Natur selten bis kaum vor. Zur Sicherstellung der Betriebsfähigkeit muss ein Fusionskraftwerk Tritium daher selbst erzeugen können (sogenannte Tritium-Erbrütung) sowie unbenutzten Brennstoff durch einen geschlossenen Kreislauf wiederverwerten (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2014b).

Das „**Tripelprodukt**“ ist der Hauptmaßstab für einen Nettoenergiegewinn in einer Fusionsreaktion. Es setzt sich zusammen aus der Temperatur, der Dichte und der Einschlusszeit (wie lange Energie im Plasma gespeichert wird) des Plasmas. Umso größer das Tripelprodukt, desto besser die Energiegewinnung bei der Fusionsreaktion (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2025c).

Um Plasma einzuschließen und Fusion zu ermöglichen, gibt es **zwei Hauptmethoden**: den magnetischen Einschluss und den Trägheitseinschluss. Beim **magnetischen Einschluss** halten starke Magnetfelder ein extrem heißes, dünnes Plasma zusammen. Beim **Trägheitseinschluss** erhitzen und komprimieren Laser- oder Teilchenstrahlen ein kleines Brennstoffkugeln, das sogenannte Target, bis der Brennstoff fusioniert (Yamada, 2025). Derzeit gelten der **magnetische Einschluss durch Tokamaks oder Stellaratoren** sowie der **Trägheitseinschluss mit Lasern** als die vielversprechendsten und praktikabelsten Methoden des Plasmaeinschlusses.

2.1 Tokamak: Stand der Technik und zentrale Forschungsprogramme

Stand der Technik

Der Tokamak ist unter allen Fusionsansätzen der bei Weitem am besten erforschte und entwickelte Ansatz. Nach Angaben der IAEA gibt es derzeit (Stand Dezember 2025) weltweit 56 aktive Tokamak-Anlagen,

gegenüber 13 Stellaratoren- und 6 Laserfusionsanlagen (International Atomic Energy Agency, 2025a).

Bei dieser Technologie wird das Plasma durch das Zusammenspiel dreier überlagernder Magnetfelder gehalten, wie Abbildung 1 zeigt. Magnetspulen umgeben das torusförmige Reaktorgefäß und erzeugen ein ringförmiges Magnetfeld. Gleichzeitig induziert eine im Inneren des Tokamaks platzierte **Transformerspule** einen elektrischen **Strom im Plasma**, wodurch ein weiteres Magnetfeld entsteht. Vertikalspulen oben und unten ergänzen mit ihrem Magnetfeld die Einschlusskonfiguration. Zusätzliche **Poloidalfeldspulen** kontrollieren aktiv den Plasmastrom und fügen sich in das Gesamtsystem der Magnetfelder ein. So entsteht ein **gesamtes Magnetfeld**, das das Plasma von der Reaktorwand fernhält. Der Plasmaeinschluss erfordert beim Tokamak **gepulsten Strom**. Ein Dauerbetrieb ist bei den gängigsten Konzepten, bei denen der Plasmastrom induktiv angetrieben wird, derzeit noch nicht möglich (Wurbs et al., 2024). Nicht-induktive Ansätze mit Dauerbetrieb für den Tokamak existieren zwar, sind aber bisher wenig ausgereift (Kikuchi, 2010).

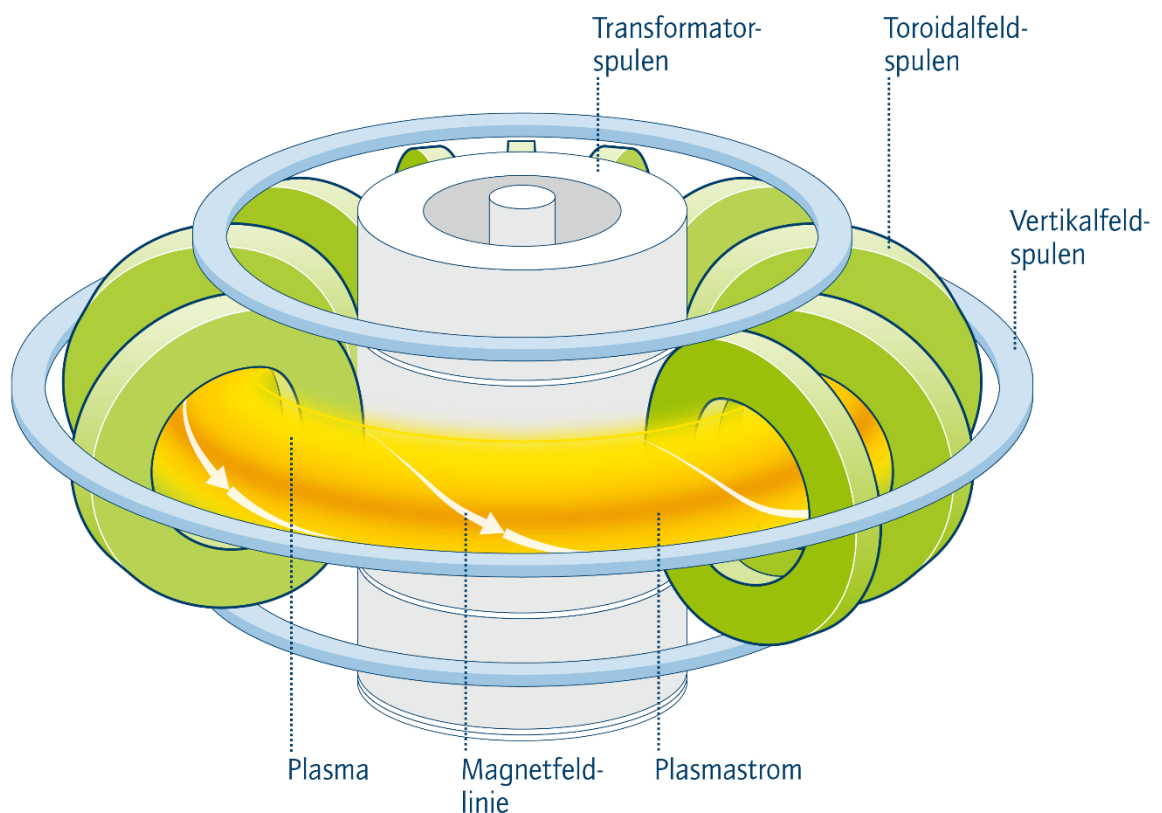


Abbildung 1: Tokamak – schematische Darstellung

Quelle: eigene Darstellung nach Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP)

Der Plasmaeinschluss im Tokamak hängt daher teilweise von einem Strom innerhalb des Plasmas selbst ab – dies ist eine Schwachstelle des Tokamaks. Wenn man Tokamaks zu nahe an den Betriebsgrenzen betreibt, kann das Plasma instabil werden. So kann es zu **Disruptionen** kommen, die im ungünstigsten Fall zum Abriss des Plasmastroms führen. Dabei wird ein Großteil der gespeicherten magnetischen und thermischen Energie freigesetzt, was zu Schäden am Wandmaterial sowie Gefäßeinbauten führen kann (Grünwald, 2024).

Die einzige Komponente, die im Normalbetrieb das Plasma berührt, ist der Divertor. Die Plasmateilchen prallen

auf den Divertor, um aufgefangen und abgepumpt zu werden. So lassen sich Fusionsprodukte (etwa die Heliumkerne) und störende Verunreinigungen aus dem Plasma entfernen (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2014a). Der Divertor ist somit wesentlich für den Reaktorbetrieb – aber auch außergewöhnlich belastet.

Tokamaks haben wichtige Zwischenziele in der Entwicklung der Fusion erreicht. Der Joint European Torus (JET) im Vereinigten Königreich erzeugte 1991 erstmals signifikante Energie aus Deuterium-Tritium-Fusion (Wurbs et al., 2024) und produzierte 2023, kurz vor seiner Stilllegung, 69 Megajoule Energie in einem Puls – ein bis heute unübertroffener Rekord. Im Jahr 2025 stellten Tokamaks einen Rekord für die längsten Plasmaeinschlüsse auf: zunächst etwa 18 Minuten in der chinesischen Anlage EAST (Chinese Academy of Sciences, 2025) und kurz darauf über 22 Minuten in der französischen Anlage WEST (CEA, 2025). So verfügen Tokamaks über eine validierte Systemarchitektur, erprobte Reaktortechnologien (insbesondere hinsichtlich des Divertors) und globale Infrastruktur, was sie für einen ersten Demonstrator technisch greifbar macht.

Öffentliche und private Schlüsselakteure

Der internationale Experimentalreaktor **ITER** befindet sich aktuell im Bau. Bei geplanter Inbetriebnahme im Jahr 2035 wird ITER mit 840 Kubikmetern Plasmavolumen die weltweit **größte Tokamak-Forschungsanlage** werden. ITER wird vor allem für Forschungszwecke verwendet und hat das vorrangige Ziel, ein brennendes Plasma mit einer Leistung von 500 Megawatt (MW) zu erreichen. Daneben sollen Experimente zur **Erbrütung von Tritium** durchgeführt werden (ITER Organization, 2023a; Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2024b).

Durch die Beteiligung der Europäischen Union sind deutsche Stakeholder mit **Forschungs- und Zuliefereraktivitäten** in ITER involviert. Nach einer Auswertung des Fusion Industrial Liaison Office (FILO), basierend auf einer E-Mail-Auskunft vom 13. Februar 2026, konnten deutsche Unternehmen durch ITER bis Ende 2025 einen **Auftragswert** in Höhe von rund 1 Milliarde Euro verzeichnen. Über diverse Forschungsaktivitäten bietet Deutschland **Expertise** für ITER (BMBF, 2023): So stellte das Tritiumlabor Karlsruhe des KIT ITER ein erstes **integriertes Design zum Brennstoffkreislauf** zur Verfügung (Karlsruher Institut für Technologie, 2025), und auch das Forschungszentrum Jülich liefert mit Studien zu **Plasma-Wand-Wechselwirkungen** oder zur **Materialforschung** Erkenntnisse für ITER (Forschungszentrum Jülich, 2024a, 2024b; Karlsruher Institut für Technologie, 2025).

Der **ASDEX Upgrade** Tokamak, betrieben vom Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching, ist eine der relevantesten Forschungsanlagen im Bereich Magnetfusion. Forschungsaktivitäten umfassen sowohl die Untersuchung von **Plasmaszenarien** und **Wandmaterialien** als auch Aspekte der **Wärmeauskopplung** (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2024b; Wurbs et al., 2024). Als wegbereitend gilt die Qualifizierung und Wahl des ASDEX Upgrade von **Wolfram als Wandmaterial** für den Reaktor (Schweitzer, 2024; Wurbs et al., 2024). Kurz- und mittelfristig wird so die deutsche Tokamak-Anlage ASDEX Upgrade eine wichtige Rolle bei der Entwicklung von Betriebszenarien für ITER spielen (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2024b). Da ASDEX Upgrade bereits 35 Jahre alt ist, wird es in den kommenden 10 Jahren in seiner Bedeutung vom bestehenden JT-60SA sowie den derzeit im Bau befindlichen DTT (Italien), BEST (China) und STEP (Vereinigtes Königreich) überholt werden.

Seit der Stilllegung des JET im Jahr 2023 ist der japanisch-europäische Reaktor JT-60SA der weltweit größte aktive Tokamak. Mit der Anlage sollen unter anderem Forschungserkenntnisse, insbesondere um das

Plasmaverhalten, für den Betrieb von ITER vorbereitet und zugeliefert werden (F4E, 2025). Deutschland trägt als Mitglied von F4E, durch Forschungsaktivitäten des Max-Planck-Instituts an JT-60SA (F4E, 2020) sowie durch Forschungs- und Technologieprojekte am Forschungszentrum Jülich zu ITER bei.

In China und den USA wurde erheblich in die Tokamak-Technologie investiert, um staatliche und private Anlagen auf dem Weg zu einem Kraftwerk voranzutreiben. Dadurch haben diese Länder einen **wesentlichen Vorsprung** im globalen Tokamak-Wettbewerb erreicht.

Das amerikanische Unternehmen Commonwealth Fusion Systems (CFS), ein Spin-out des Massachusetts Institute of Technology und das am stärksten finanzierte private Fusionsunternehmen, baut den **kompakten Hochfeld SPARC-Tokamak** (F4E Fusion Observatory, 2025). Dieser Demonstrationsreaktor soll im Jahr 2027 im Kurzpulsbetrieb eine positive Energiebilanz erzielen (CFS, 2025b). Für ein Kraftwerk fehlen aber wesentliche Technologien wie zum Beispiel das Brut-Blanket. Mit ARC, dem Nachfolger von SPARC, strebt CFS für die frühen 2030er Jahre an, das erste netzgekoppelte Fusionskraftwerk umzusetzen (VDI Bayern, 2024; CFS, 2025b). Seit 2023 kooperiert das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) mit CFS entlang verschiedener Bereiche und erhält damit auch die Möglichkeit, wissenschaftliche Ideen an SPARC zu testen (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2024b).

2.2 Stellarator: Technologiekonzept und zentrale Forschungsanlagen

Stand der Technik

Alternativ zum Tokamak steht für die Realisierung einer Magnetfusionsanlage der **Stellarator** zur Verfügung, der in Abbildung 2 veranschaulicht wird. Hinsichtlich des physikalischen Verständnisses und zum Teil auch in Bezug auf die technologische Entwicklung liegt der Stellarator hinter dem Tokamak zurück (Wurbs et al., 2024). So gibt es insbesondere keine Stellarator-Anlagen, die eine experimentelle Einschusskalierung zum Kraftwerk erlauben, wie bei den Tokamaks JET und JT60-SA (Wolf et al., 2010).

Gleichwohl weist das Konzept des Stellarators einen wesentlichen Vorteil für den Kraftwerksbetrieb auf: Anders als bei den meisten Tokamak-Konzepten läuft eine Anlage des Typs Stellarator nicht über gepulsten Strom, da das Magnetfeld zum Einschließen des Plasmas nur über **äußere Magnetspulen** erzeugt wird. Damit eignet sich das Stellarator-Konzept sehr gut für den **Dauerbetrieb** in einem Fusionskraftwerk. Ein Verlust des magnetischen Einschlusses durch Instabilitäten wie beim Tokamak (Disruptionen) ist beim Stellarator nicht möglich (Helander et al., 2012). Aufgrund des Wegfalls von Plasmastrom erfordert die Geometrie des Stellarators zur Erzeugung des Magnetfelds allerdings **komplex geformte Spulen** (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2024b; Wurbs et al., 2024).

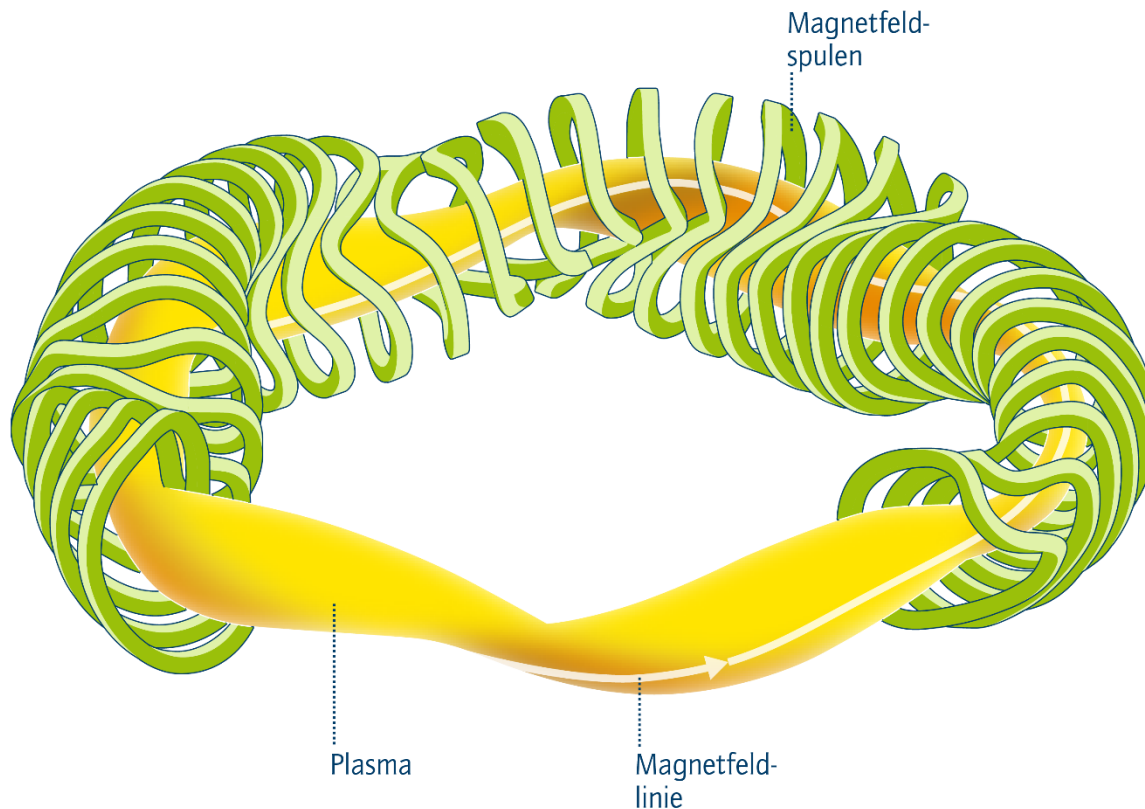


Abbildung 2: Stellarator – schematische Darstellung

Quelle: eigene Darstellung nach Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP)

Forschungsprogramme und -anlagen

Die weltweit **größte und leistungsstärkste Forschungsanlage** vom Typ Stellarator ist der **Wendelstein 7-X**, angesiedelt am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Greifswald. Dort konnte im Jahr 2023 bei einer Heizleistung von 2,7 Megawatt eine **Plasmadauer von über 8 Minuten** verzeichnet werden (Wurbs et al., 2024). Im Gegensatz zu den oben genannten Langpuls-Tokamak-Experimenten sind hier die Plasmadichten bereits im für ein Kraftwerk erwarteten Bereich. Bei Langpulsentladungen mit relevanten Plasmametern (Tripelprodukt versus Entladungsdauer) konnte Wendelstein 7-X trotz geringeren Plasmavolumens schon ähnlich gute Werte, wie der Tokamak JET, erzielen (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2025c).

Die seit 2015 in Betrieb stehende Anlage fasst ein Plasmavolumen von 30 Kubikmetern und ist damit das größte Experiment innerhalb dieses Konzeptes. Ziel der Forschungsaktivitäten um den Wendelstein 7-X ist es, eine Dauer der Plasmaentladung von bis zu 30 Minuten zu erreichen sowie zu zeigen, dass der Plasmaeinschluss bei optimierten Stellaratoren ähnlich gut sein kann wie bei Tokamaks. Aufgrund ihres Plasmavolumens ist die Anlage primär für Forschungszwecke und nicht für die Energieerzeugung ausgelegt. Charakteristische Merkmale der Energie liefernden Plasmen, wie sie im Tokamak-Konzept erforscht werden, können zum Teil auf einen Stellarator übertragen werden (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2024b).

Deutschland verfügt über eine starke Zulieferindustrie für Stellarator-spezifische Komponenten; Schlüsselkomponenten für Wendelstein 7-X wurden in der deutschen Industrie erfolgreich gefertigt, zum

Beispiel die nicht-planaren Spulen und das Vakuumgefäß (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2024a).

In Zusammenarbeit mit dem Industriepartner Thales aus Frankreich und dem KIT wurden für Wendelstein 7-X und ITER Gyrotrons mit einer Heizleistung von etwa einem Megawatt und Dauerstrichfähigkeit entwickelt und geliefert (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2024a).

Aus dem privaten Sektor gibt es nach Angaben der Fusion Industry Association (FIA) weltweit **9 Fusionsunternehmen**, die sich auf den Ansatz des Stellarators fokussieren – davon kommen 2 aus Deutschland: Proxima Fusion und Gauss Fusion (Fusion Industry Association (FIA), 2025).

Proxima Fusion ging 2023 als Spin-out aus dem IPP hervor. Aufbauend auf Erkenntnissen und Erfahrungen zu Wendelstein 7-X besteht das Ziel darin, in den 2030er Jahren mit dem Demonstrationsstellarator Alpha einen Nettoenergiegewinn zu erzielen und danach mit dem Fusionskraftwerk **Stellaris** Strom ins Netz einspeisen zu können. Im Februar 2026 wurde eine Absichtserklärung zwischen der bayerischen Staatsregierung, Proxima Fusion, dem IPP sowie RWE signiert. Darin wird die Unterstützung seitens des Freistaats Bayern für den Bau von Alpha erklärt und ein Standort für das geplante kommerzielle Fusionskraftwerk Stellaris identifiziert (Proxima Fusion, 2026).

Gauss Fusion wurde im Jahr 2022 durch eine paneuropäische Allianz gegründet. Es ist geplant, bis Mitte der 2040er Jahre mit dem Gauss GIGA-Kraftwerk Strom ins Netz einspeisen zu können. Im Oktober 2025 stellte Gauss Fusion seinen Conceptual Design Report (CDR) fertig, aus dem der Zeit- und Kostenrahmen sowie Details zur technischen Umsetzung für die Realisierung eines Fusionskraftwerks hervorgehen. Mit dem CDR liegt nach Aussage von Gauss Fusion für Europa das erste ganzheitliche Design für ein kommerzielles Fusionskraftwerk vor (Gauss Fusion, 2025).

2.3 Laserfusion: Konzepte, Forschungsstand und internationale Entwicklungen

Stand der Technik

Zwar hat sich die Fusionsforschung traditionell eher auf den magnetischen Einschluss konzentriert, doch hat die Laserfusion in jüngster Zeit bedeutende wissenschaftliche Fortschritte erzielt. Insbesondere die jüngsten Durchbrüche an der **National Ignition Facility (NIF)** in den USA haben dieses Forschungsgebiet ins Licht der Öffentlichkeit gerückt. Im Jahr 2022 gelang es der NIF erstmals, einen **Energiegewinn aus Fusion** zu beweisen (Department of Energy Office of Science, 2023; Häfner et al., 2023). Damit konnte die **Fusionsreaktion mehr Energie freisetzen, als durch die Laser ins Plasma geliefert** wurde. Obwohl der Energiegewinn den gesamten Energieverbrauch der Laser nicht ausgleichen konnte, hatte bisher kein anderes Experiment (weder magnet- noch laserbasiert) jemals diesen Meilenstein erreicht.

Die Forschung zur Laserfusion untersucht **mehrere Grundkonzepte**, von denen – in absteigender Reihenfolge – die fortschrittlichsten Indirect Drive, Direct Drive, in Abbildung 3 dargestellt, sowie Fast Ignition und Shock Ignition sind (Wurbs et al., 2024). Das Konzept Indirect Drive, mit dem auch der Energiegewinn am NIF erzielt wurde, ist im Vergleich mit Abstand am weitesten fortgeschritten und konnte am NIF auch mit entsprechender Skalierung validiert werden. Beim **Indirect Drive** treffen Laserstrahlen auf eine Kapsel, den sogenannten Hohlraum, der einen Brennstoffkorn enthält. Im Hohlraum entsteht Röntgenstrahlung, die den Brennstoff gleichmäßig komprimiert und zündet. Beim **Direct Drive** treffen aus allen Richtungen Hunderte Laserstrahlen gleichzeitig auf das Brennstoff-Target und komprimieren es gleichmäßig, um die Zündung auszulösen. Bei der **Fast Ignition** laufen Kompression und Zündung getrennt ab: Ein erster Laserpuls

komprimiert und erhitzt das Brennstoff-Target, ein zweiter, fokussierter Puls zündet es. Die **Shock Ignition** folgt ebenfalls einem zweistufigen Prinzip: Zwei Kompressionswellen wirken auf das Brennstoff-Target, wobei die zweite, noch intensivere Welle die Zündung auslöst (Department of Energy Office of Science, 2023).

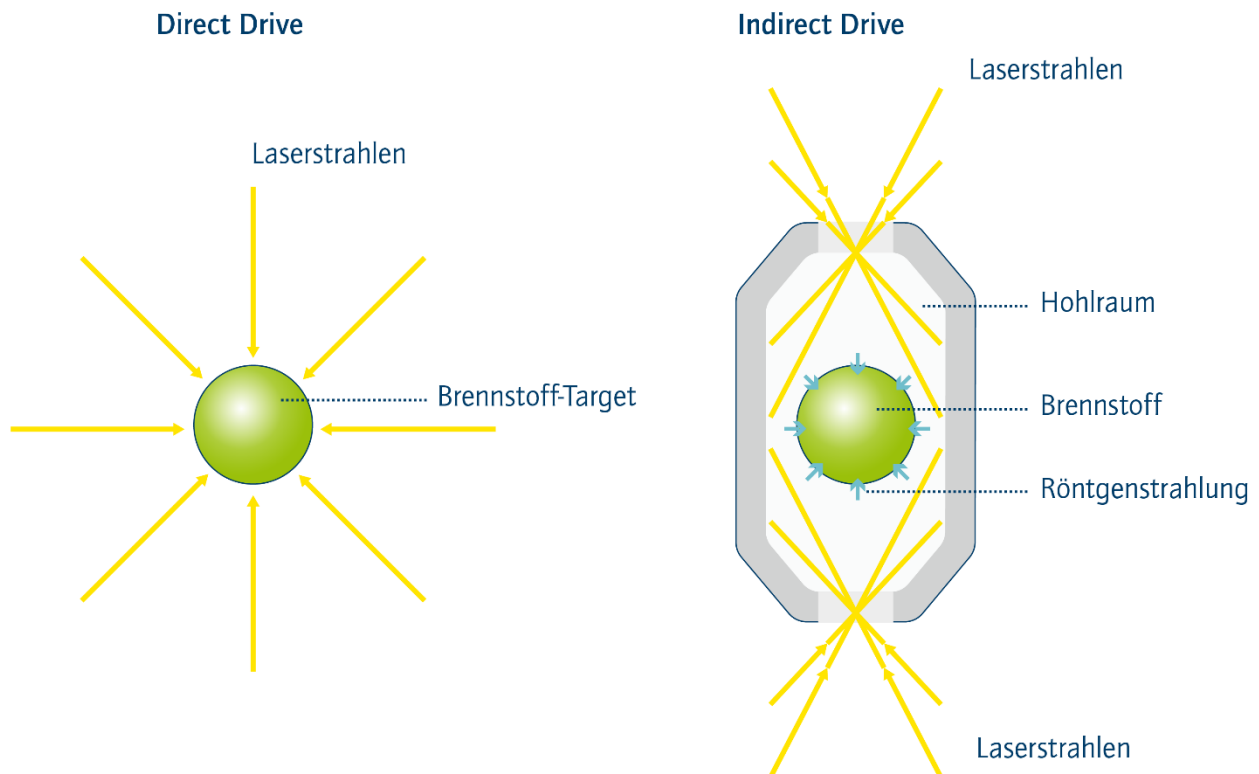


Abbildung 3: Laserfusion (Direct Drive und Indirect Drive) – schematische Darstellung

Quelle: eigene Darstellung nach BMFTR 2024, S. 12

Wenngleich Indirect Drive und Direct Drive als die am weitesten entwickelten Ansätze gelten (Department of Energy Office of Science, 2023; Wurbs et al., 2024), ist noch ungewiss, welcher sich am besten für ein Kraftwerk eignet. Durch den Indirect Drive wird eine gleichmäßige Targetkompression erreicht, was die Zündung erleichtert. So wurde Indirect Drive in der Forschung am weitesten vorangetrieben. Direct Drive hingegen verspricht eine höhere Effizienz, was der Wirtschaftlichkeit des Kraftwerks entgegenkäme. Dieser Ansatz steht jedoch vor höheren lasertechnischen Hürden (Häfner et al., 2023).

Forschungsprogramme und -anlagen

Die **USA** dominieren die Forschung zum Indirect Drive, vor allem am **Lawrence Livermore National Laboratory** (Standort der NIF) und am Los Alamos National Laboratory. Auch zum Direct Drive verfügen die USA über Hochleistungsanlagen, insbesondere den **OMEGA-Laser** an der University of Rochester mit einer Pulsenergie von 30 Kilojoule bei einer Spitzenleistung von 30 Terawatt (Häfner et al., 2023; University of Rochester, 2025).

In **Frankreich** gilt der **Laser Megajoule (LMJ)** als wichtigste Laserfusionsanlage – im Laufe des Jahres 2026 soll sie voll einsatzbereit sein, um eine Zündung mit Indirect Drive zu erreichen. In **Russland** wird mit der Anlage **UFL-2M** eine Trägheitsfusionseinrichtung aufgebaut, die eine **Laserenergie von bis zu 2,8 Megajoule** erzielen und damit etwa das **1,5-Fache der Impulsenergie des NIF** sowie höhere Werte als **LMJ** liefern soll (Department of Energy Office of Science, 2023). Auch **China** forscht intensiv an Fusionstechnologie, Materialien und Sicherheit: Der **ShenGuang-III-Laser** im Laser Fusion Research Center in Shanghai bildet die Basis für umfassende Studien zur Laserfusion (Department of Energy Office of Science, 2023). In **Japan** ist das Institut für Lasertechnik der Universität Osaka das Zentrum der Forschung zur Laserfusion, insbesondere das Fast-Ignition Realization Experiment (**FIREX**) (Department of Energy Office of Science, 2023).

Auch in **Deutschland** gibt es mehrere **Forschungsinstitute**, die sich auf die Laserforschung und Laserfusion spezialisiert haben, insbesondere die Helmholtz-Einrichtungen HZDR, GSI, DESY und HI-Jena sowie die Fraunhofer-Institute für Lasertechnik in Aachen und für Optik und Feinmechanik in Jena. **Allerdings verfügt Deutschland** bisher nicht über Implosionsforschungsanlagen, die mit den Anlagen in den USA, Frankreich oder China vergleichbar wären. Eine weitere deutsche Besonderheit ist die **Expertise** und Kompetenz in der **Herstellung von Targets** (insbesondere TU Darmstadt, Fraunhofer IAF, LMU München, HZDR). Das Herstellungsverfahren für die ersten erfolgreichen NIF-Targets wurde am Fraunhofer IAF entwickelt und von dessen Spin-off Diamond Materials kommerzialisiert. Neben der Nutzung dieses Know-hows kann die Target-Entwicklung weitere Branchen einbeziehen. Qualitätskontrolle könnte sich auf das Entwicklungszentrum Röntgen EZRT am Fraunhofer IIS und auf mehrere Unternehmen (darunter Bruker, Leica Microsystems und Zeiss) verteilen (Häfner et al., 2023).

Der in Hamburg ansässige **European XFEL** (an dem Deutschland mit 56 Prozent Stakeholder ist) ist die hellste Röntgen-Freie-Elektronen-Laserquelle weltweit. Dabei handelt es sich zwar nicht um einen für die Fusion geeigneten Laser, aber zur Analyse der Interaktion zwischen Laser und Targets. Damit kann der European XFEL zur **Laserplasmaphysik und -diagnostik** beitragen (Leemans et al., 2023; European XFEL, 2024).

Darüber hinaus verfügt Deutschland über eine **starke Zulieferindustrie** für hochenergetische **Laser- und Optiksyste**me: Die deutsche Industrielandschaft umfasst mehrere spezialisierte Akteure, die wichtige Technologien wie Hochleistungsdiodenlaser und Ultrakurzpulssysteme entwickeln. Weitere deutsche Unternehmen ergänzen das Angebot durch zentrale optische Komponenten und Präzisionsbeschichtungen für Laseranwendungen.

Die **deutschen Fusionsunternehmen Marvel Fusion und Focused Energy** spielen eine wichtige Rolle für das Wachstum der privaten Laserfusionsindustrie und stellen derzeit besonders finanzstarke Fusionsunternehmen dar (Fusion Industry Association (FIA), 2025). Marvel Fusion, gegründet im Jahr 2019, entwickelt ultrakurz gepulste Hochenergielaser mit proprietären nanostrukturierten Brennstoff-Targets und hat sich zum Ziel gesetzt, bis Mitte der 2030er Jahre ein kommerzielles Fusionskraftwerk zu realisieren; bis 2027 soll eine Proof-of-Technology-Demonstrationsanlage fertiggestellt werden. Das deutsch-amerikanische Unternehmen Focused Energy ging im Jahr 2021 als Spin-out der TU Darmstadt hervor und strebt dabei die Realisierung eines Fusionskraftwerks bis 2035 an. **Partnerschaften** zwischen etablierten Unternehmen, aufstrebenden Firmen und öffentlicher Forschung können dieses Potenzial nutzen, wie an der LMU (Marvel Fusion, 2025), der TU Darmstadt (Häfner et al., 2023) oder an dem kürzlich gegründeten **Fusionscampus in Biblis** (Hessen Innovativ, 2025).

2.4 Basistechnologien für Fusionsenergie

Materialanforderungen für Fusionsreaktoren

Die Materialien eines Fusionsreaktors müssen extremen Bedingungen standhalten: Hitze, Strahlung und mechanischem Stress. Am stärksten beansprucht werden die erste Materialschicht in der Reaktionskammer – die **sogenannte erste Wand** – und im magnetischen Einschluss der **Divertor**. Diese Materialien müssen andauernd Wärmeflüsse von etwa 10 Megawatt pro Quadratmeter und Neutronenschäden von etwa 20 Displacements per Atom aushalten können (Gilbert et al., 2013; Ueda et al., 2017). Dafür müssen sie besonders hohe Hitzebeständigkeit, geringe thermische Ermüdung und niedrige Aktivierung aufweisen. Außerdem sollten sie nicht mit dem Plasma interagieren – vor allem möglichst wenig Tritium adsorbieren.

Wolfram hat sich mit seinen widerstandsfähigen Eigenschaften, etwa dem hohen Schmelzpunkt oder der geringen Wasserstoffpermeation, als besonders geeignetes Material für den Einsatz in einem Fusionsreaktor erwiesen (Forschungszentrum Jülich, 2024c; Wurbs et al., 2024). Nach erfolgreicher Testung in ASDEX Upgrade und JET wird die erste **Wand von ITER** aus Wolfram bestehen. Spezielle Legierungen, wie Kupfer-Chrom-Zirkon, sind besonders geeignet für die Basisstruktur von hitzebelasteten Komponenten, zum Beispiel dem Divertor (Richardson et al., 2021). Die zeitnahe Entwicklung von fusionspezifischen Komponenten sowie die Durchführung von Tests, die zumindest einzelne Parameter darstellen können, sind wesentliche Aspekte. Insbesondere bei der Belastung mit Neutronen stehen dabei allerdings nur sehr begrenzt experimentelle Anlagen zur Verfügung. Letztendlich wird die **Zusammenwirkung aller Belastungsfaktoren** (mechanische Beanspruchung, Hitze, Neutronenstrahlung) in der Entwicklung und Testung von Komponenten berücksichtigt werden müssen. Diese Zustände gleichzeitig zu erzeugen, gelingt jedoch nur in einem Fusionsreaktor.

Bei der Laserfusion sind die Materialien in der Reaktionskammer keiner kontinuierlichen, sondern einer wiederholten, schockartigen Belastung ausgesetzt (Grünwald, 2024). Es wurden mehrere Lösungen für die verschiedenen Ansätze vorgeschlagen – insbesondere zur **Mitigation** der Auswirkungen von hochenergetischen Ionen und Gammastrahlung. Diese reichen von selbstheilenden Wänden aus flüssigen Metallen bis hin zur Verwendung eines Schutzgases (zum Beispiel Xenon, abhängig von Brennstoff und Reaktorkonzept), das die Strahlung abschwächt. Die Lösungsansätze befinden sich jedoch noch in einem **frühen Entwicklungsstadium** (Department of Energy Office of Science, 2023).

In Deutschland sind Spitzenforschungseinrichtungen für **Materialentwicklung** ansässig. Dazu gehören vor allem das Forschungszentrum Jülich (FZJ) mit Forschung zur Plasma-Material-Wechselwirkung, das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) mit der Entwicklung von Strukturmaterialien sowie das IPP für Materialien der ersten Wand.

Neutronenresistente Materialien, Blankets und Tritium-Kreislauf

Hochenergetische **Fusionsneutronen** beeinträchtigen die Strukturmaterialien auf verschiedene Weise – sie **beschädigen**, **schwächen** und **verändern** sogar deren elementare Zusammensetzung (Transmutation). Deshalb müssen viele Komponenten von Fusionsreaktoren aus **Spezialstählen wie Eurofer** gefertigt werden (Grünwald, 2024; Lion et al., 2025); diese sind besonders robust und erzeugen bei der Transmutation nur wenige radioaktive Elemente. Doch es **fehlen Anlagen**, um Materialien unter reaktorähnlicher Neutronenbestrahlung (hoher Anteil von Neutronen mit 14 Megaelektronenvolt Energie) **ausreichend zu testen** (EPRI, 2022; Department of Energy Office of Science, 2023). Bei der Trägheitsfusion werden aufgrund

der zeitlich extrem gebündelten und intensiven Neutronenflüsse zusätzliche Materialschäden erwartet (Department of Energy Office of Science, 2023).

Die geplante **IFMIF-DONES** (International Fusion Materials Irradiation Facility – DEMO-Oriented Neutron Source)-Anlage wird die benötigte **Testinfrastruktur** zur Verfügung stellen, um Materialproben für Neutronenbeständigkeit im Dauerbetrieb zu testen; die Aspekte der intensiven Pulse der Trägheitsfusion können dort allerdings nicht untersucht werden. Die Anlage befindet sich jedoch **noch im Bau** und wird voraussichtlich ab 2034 in Betrieb gehen (IFMIF-DONES, 2025). Obwohl der Neutronenfluss dabei erheblich kleiner ist als in einem Fusionsreaktor, können die physikalischen Prozesse auf die Reaktorbedingungen extrapoliert werden. Neben Materialtests wird IFMIF-DONES, bei Nutzung der Medium Flux Area, auch zum Testen von Blankets beitragen (Rapisarda et al., 2025; Hernández et al., 2026).

Die Neutronen müssen eingefangen werden, um **das in der Natur nicht vorkommende Tritium zu erzeugen** und die Anlage damit zu versorgen (Wurbs et al., 2024). Dies geschieht durch eine **Brutreaktion** zwischen **Neutronen und Lithium** (insbesondere mit dem Isotop Lithium-6), die im Blanket abläuft. **Neutronenmultiplikatoren wie Blei und Beryllium** sind notwendig, um die entsprechende Neutronenrate für eine **Tritium-Selbstversorgung zu erreichen** (Wurbs et al., 2024). Es gibt **drei Hauptansätze** für die Technologie der **Tritium-Brut-Blankets**: Der erste und am weitesten entwickelte (**Helium Cooled Pebble Beds**) nutzt lithium- und multiplikatorhaltige Keramikkugeln. Helium strömt durch die Kugeln, um die Wärme und das entstehende Tritium aus dem Blanket zu extrahieren. HCPB soll Neutronen am besten abschirmen und Tritium am effizientesten erzeugen, erfordert jedoch eine komplexe Konstruktion mit zahlreichen Bauteilen. Beim zweiten Ansatz (**Liquid Lithium Lead**) fließt eine flüssige Mischung aus Blei und Lithium durch Rohrleitungen des Blanket. Das dabei entstehende Tritium muss dann wiederum aus dem Flüssigmetall abgeschieden werden. Flüssiges Lithium arbeitet auch bei niedrigem Lithium-Anreicherungsgrad zuverlässig und bietet exzellente thermische Leistung. Die zugrunde liegenden flüssigen Metalle sind jedoch sehr korrosiv. Der dritte und am wenigsten ausgereifte Typ (**FLiBe**) setzt auf geschmolzene Salze aus Fluor, Beryllium und Lithium. FLiBe basiert auf einem schlichten, kompakten Design und bietet die beste Neutronenabschirmung für die Magneten. Allerdings schützen die aktuellen Entwürfe die Komponenten im Vakuumgefäß des Reaktors nicht, was den Wartungsaufwand deutlich erhöht. Zudem kann das enthaltene Fluor hochkorrosive Fluorwasserstoffsäure bilden (Clark et al., 2025). Wenngleich Blankets eine zentrale Rolle für die Tritium-Versorgung spielen, sind sie **bisher wenig entwickelt**.

Der Brennstoffkreislauf ist bereits in bestehenden Forschungsanlagen wie dem Tritiumlabor Karlsruhe vorhanden. Für große, kommerzielle Reaktoren bedarf es jedoch einer Skalierung der notwendigen Technologien für den Brennstoffkreislauf. Während die Aufreinigung des Brennstoffs durch die jahrzehntelange Forschung für die Magnetfusion (beispielsweise am KIT) bereits einen hohen Reifegrad aufweist, steht die Bereitstellung des Brennstoffs bei der Laserfusion vor der spezifischen Herausforderung der industriellen Massenfertigung von Targets (Department of Energy Office of Science, 2023). Sowohl die Magnet- als auch die Laserfusion müssen die Skalierung des Tritium-Inventars vom Gramm- in den Kilogramm-Maßstab für den kommerziellen Betrieb noch leisten.

Kanada spielt eine Schlüsselrolle in der weltweiten **Versorgung mit zivilem Tritium**, das als Nebenprodukt in den Kernkraftwerken vom Typ CANDU entsteht (Grünwald, 2024) und in der Fusion vor allem für die Entwicklungsphase und das Starten der Reaktoren nötig ist. Das Unternehmen **Kyoto Fusioneering** gewinnt mit neuen Testanlagen wie UNITY-2 in Kanada an Bedeutung in der Entwicklung des Brennstoffkreislaufs.

Schwerpunkt von UNITY-2 ist die Erprobung von mehreren Teilen des Brennstoffzyklus als integriertes System (Canadian Nuclear Laboratories, 2025). Das **Vereinigte Königreich** investiert stark in Tritium-Forschung und Brut-Technologie, teils im Rahmen öffentlicher Projekte wie LIBRTI mit Fokus auf Brut-Blankets, teils in Zusammenarbeit mit der Industrie. Die neue Anlage H3AT zum Beispiel entsteht in Zusammenarbeit zwischen der britischen Atomenergiebehörde (UKAEA) und dem italienischen Energieunternehmen Eni zur Erforschung von Technologie für den Umgang mit Tritium (U.K. Atomic Energy Authority, 2025b). **Deutschland** verfügt ebenfalls über eine solide Forschungsinfrastruktur in den Bereichen Tritium, Erbrütung und Brennstoffkreislauf: Das **KIT** zählt zu den führenden Standorten weltweit – dank seines **Tritiumlabors** und seiner herausragenden **Expertise** in der **Entwicklung von Brut-Technologien**.

Supraleitertechnologien für den magnetischen Plasmaeinschluss

Das Einschließen des Plasmas für die Fusionsreaktion erfordert **starke Magnetfelder, typischerweise über 10 Tesla** (ITER Organization, 2023b). Um solche Magnetfelder energieeffizient zu erzeugen, werden **Supraleiter** benötigt. Diese Materialien weisen bei tiefen Temperaturen (bei klassischen Supraleitern etwa -264 Grad Celsius) praktisch keinen elektrischen Widerstand auf (Wurbs et al., 2024). Hierbei unterscheidet man zwischen **Hochtemperatursupraleitern** (High Temperature Superconductors, HTS) mit Betriebstemperaturen von circa 20 bis 30 Kelvin (zwischen -243 und -253 Grad) und **Niedrigtemperatursupraleitern** (Low Temperature Superconductors, LTS) mit einer Betriebstemperatur von circa 4 Kelvin (-269 Grad).

Die für **LTS** notwendige Kühlungstechnologie basiert auf flüssigem Helium, was einen hohen Aufwand hinsichtlich Kosten und Energie verursacht (Takeda und Pearson, 2018). Dafür sind LTS in der Entwicklung weit fortgeschritten: LTS-Magneten aus Niob-Zinn oder Niob-Titan werden seit Jahren in den Forschungs-Tokamaks KSTAR, WEST und JT60-SA sowie in dem Stellarator Wendelstein 7-X eingesetzt (ITER Organization, 2023b). Mit einer zukünftigen Validierung im Rahmen von **ITER** können LTS-Magneten in einem nahezu vollständigen Tokamak-System erprobt werden (Von Müller und Zohm, 2023). Für den chinesischen BEST Hochfeld-Tokamak werden neueste LTS entwickelt, die auch in dem High-Luminosity Upgrade am CERN Anwendung finden. Diese werden in großen Mengen in Deutschland von Bruker produziert.

HTS-Magneten hingegen bringen weniger Herausforderungen bei der Kühlung mit sich und ermöglichen höhere Magnetfelder. Das Fusionsunternehmen Commonwealth Fusion Systems demonstrierte im Jahr 2021 mit HTS-Magneten ein **Magnetfeld von mehr als 20 Tesla** (CFS, 2025a). Zum Vergleich: Die LTS-Magneten für ITER sollen Magnetfelder von 11,8 Tesla erzeugen (ITER Organization, 2023b). Weil HTS-Magneten höhere Magnetfelder ermöglichen, ist ein fusionsrelevanter Plasmaeinschluss auch in kleineren Anlagen zu erzielen (Grünwald, 2024) – und damit würden die Kosten für den Bau des Kraftwerks deutlich reduziert. Aus diesem Grund wird intensiv an der Entwicklung HTS-basierter Reaktoren gearbeitet: Die Fusionsunternehmen Commonwealth Fusion Systems, Type One Energy (USA), Tokamak Energy (UK) und Proxima Fusion (Deutschland) setzen allesamt auf HTS-Magneten (Proxima Fusion, 2025).

Die Entwicklung von HTS birgt **Spillover-Potenziale**; Fortschritte für HTS wurden durch Investitionen in die **Teilchenbeschleunigung** für Hochenergiephysik in China und in den USA erzielt (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2025). Auch das **CERN** untersucht den Einsatz von HTS-basierten Magneten für seinen vorgeschlagenen „Future Circular Collider“ (Vaglio und Calatroni, 2019). Hochtemperatursupraleiterkabel werden auch zur innerstädtischen Stromversorgung prototypisch getestet, etwa im Forschungsprojekt

„SuperLink“ der Stadtwerke München (Münchner Stadtwerke, 2025).

Hochtemperatursupraleitung ist also eine vielversprechende, aber auch jüngere Technologie – mit einigen Entwicklungsbedarfen. Ein Beispiel hierfür ist die **Quench-Sicherheit**: Der Begriff Quench bezeichnet Instabilitäten, die zu einem plötzlichen Verlust der Supraleitung führen. Quenches stellen eine wesentliche Gefahr für Magneten (sowohl in HTS als auch in LTS) dar, weil sie signifikante Schädigungen verursachen können. Während die Quench-sicheren LTS-Magneten bereits in Betrieb sind, besteht für HTS noch Entwicklungsbedarf, insbesondere hinsichtlich der Detektion von Quenches (Wurbs et al., 2024).

Die industrielle HTS-Produktion ist im asiatischen Raum (etwa China, Japan und Korea) am weitesten entwickelt. HTS-Magneten entstehen aus Metallbändern, die mit einer mikrometerdünnen Schicht supraleitender Materialien – oft **REBCO** (Rare-Earth Barium Copper Oxide, Seltenerd-Barium-Kupferoxid) – beschichtet sind (Bottura et al., 2025). Diese Bänder werden zu Spulen gewickelt, die die Form des Magnets bilden. REBCO basiert auf seltenen Erden, deren Lieferketten meistens von **China** dominiert werden. Darüber hinaus hat das Land in jüngster Zeit erheblich in ein **REBCO-Entwicklungsprogramm** und in **HTS-Hersteller** investiert, darunter insbesondere Shanghai Superconductors. Dank einer industriell hochskalierten Fertigung gilt das japanische Unternehmen Faraday Factory (Faraday Factory, 2023) als der weltweit größte HTS-Hersteller. Auch Deutschland ist in die Entwicklung und Optimierung von HTS-Bändern und -Spulen für Fusionsanwendungen involviert, etwa durch das vom IPP geführte **Projekt „HTS4Fusion“** (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2025b).

2.5 Überblick über die Technologiereife

Tabelle 1 veranschaulicht den Entwicklungsstand zentraler Technologien für einen Fusionsreaktor, gemessen am Technologiereifegrad (englisch Technology Readiness Level, TRL) (Department of Energy, 2015). Die TRL-Skala bewertet standardisiert und übersichtlich, wie weit eine Technologie für eine bestimmte Aufgabe entwickelt ist – hier für den Einsatz in einem Fusionskraftwerk. Sie reicht von Stufe 1 (Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips) bis Stufe 9 (qualifiziertes System mit nachgewiesenem Erfolg im Einsatz). Die in Tabelle 1 skizzierten TRL-Werte wurden vom Fusionsbeirat ausgearbeitet und zur Verfügung gestellt.

	Technologieansatz → Komponente ↓	TRL (Tokamak)	TRL (Stellarator)	TRL (Laserfusion)
Querschnittstechnologien	Neutronenresiliente Materialien	3–5	3–5	3–5
	Erste-Wand-Materialien	3–5	3–5	1–2
	Blankets	3	3	3
	Tritium-Kreislauf	3–5	3–5	2–3
	Robotik und Wartung	3–5	3–5	2–3
	Schutzsysteme	8–9	8–9	8–9
	Energieumwandlung	3	3	2
Nicht übertragbare Komponenten	Plasmasimulationen	3–6	2–4	2–3
	Brennkammerdesign	6–7	4–5	1–2
	Plasmadiagnostik	4–6	4–6	2–3

Magnet- fusion	Divertor	6–7	4–5	Nicht relevant
	Plasmaheizsysteme	4–6	4–6	
	*Magnetspulen	6	4–5	
Laserfusion	Targets und Injektionskonzept	Nicht relevant		1-2
	Laserquellen			4-5
	Laserverstärker			3-4
	Optik			3-4

Tabelle 1: Überblick über den Technologiereifegrad (TRL) der wichtigsten Komponenten der drei betrachteten Technologieansätze in Bezug zu einer ersten integrierten Anlage im Prototypmaßstab als Zielsystem, die Strom durch Fusionsreaktionen erzeugen kann. Als „Querschnittstechnologien“ gelten die Themen, die für Tokamak, Stellarator und Laserfusion gleichermaßen relevant sind und synergetisch entwickelt werden können. „Nicht übertragbare Komponenten“ sind für alle Ansätze relevant, müssen aber separat angegangen werden. *Anmerkung: Für die Komponente Magnetspulen wurden die TRL-Werte für HTS und LTS für die hier behandelten Technologiekonzepte der Magnetfusion zusammengefasst dargestellt. Quelle: Fusionsbeirat und VDI Technologiezentrum GmbH (Stand Mai 2025).

Ziel von Tabelle 1 ist es lediglich, einen einheitlichen Überblick über die **Entwicklungsbedarfe** der verschiedenen Ansätze auf dem Weg zum Fusionskraftwerk zu schaffen. Neben der bloßen Entwicklung der Einzelkomponenten müssen diese in ein **integriertes System** zusammengebracht werden – dieser Integrationsschritt birgt für Fusionskraftwerke **erhebliche Kosten und Risiken**. Somit bedeuten hohe TRL-Werte für mehrere Komponenten eines Fusionsansatzes nicht automatisch, dass das Gesamtsystem kraftwerksreif ist. Außerdem erlauben TRL-Werte keine Aussagen über Kosten, Effizienz des Ansatzes, Aufwand zur Erreichung des nächsthöheren Levels oder die wirtschaftliche Machbarkeit. Eine zuverlässige und wirtschaftliche Produktion der Komponenten ist ebenso relevant für den Weg hin zum ersten Kraftwerk. Aspekte zu **Liefer- und Wertschöpfungsketten, Kosten** und **Marktbedingungen**, ohne die kein Fusionskraftwerk realisierbar ist, werden ergänzend zu technikbezogenen Faktoren in den Blick genommen.

2.6 Internationale Initiativen und Strategien der Fusionsenergie

Deutschland verfolgt neben der Beteiligung an europäischen Initiativen zunehmend eigenständige Pläne. In den Jahren 2024 und 2025 haben zwei verschiedene Bundesregierungen Maßnahmen zur Fusion angekündigt: das Forschungsprogramm „Fusion 2040“ (BMBF, 2024) sowie die Einschließung in den Schlüsseltechnologien der „**High-Tech Agenda**“ (BMFTR, 2025b), mit dem **entsprechenden Aktionsplan** (BMFTR, 2025a). Bis 2029 sind über 2 Milliarden Euro Investitionen vorgesehen, um **das weltweit erste Fusion-Demonstrationskraftwerk** zu errichten. Dies soll durch ein **industriengeführtes Konsortium** vorrangig deutscher Unternehmen geschehen und so die Unabhängigkeit Deutschlands im Energiebereich stärken. Die Strategie zielt auf den **Aufbau eines Fusionsökosystems** ab, das Fusionsunternehmen, etablierte Industriakteure und Forschungseinrichtungen strukturiert miteinander verbindet. So will Deutschland eine **internationale Führungsrolle** im Fusionsmarkt einnehmen und fördert den Übergang von wissenschaftlichen Grundlagen hin zu kommerzieller Nutzung. Insgesamt wird eine **technologieoffene** strategische Orientierung verfolgt, die entlang aller Pfade Fortschritt und Innovation ermöglichen soll.

Die folgenden Abschnitte stellen die Strategien der anderen wichtigsten Länder und überstaatlichen Akteure in der globalen Landschaft der Fusion vor.

USA – schnelle Kommerzialisierung durch Public-private-Partnerships

Die USA sind einer der wichtigsten Akteure in der weltweiten Fusionslandschaft. Die U.S. Roadmap

(Department of Energy Office of Science, 2025) fasst frühere DOE-Studien in einer konsistenten Strategie zusammen. Ziel ist es, den privaten Fusionssektor bis Mitte der 2030er Jahre zu stärken. Dabei nutzt die Strategie die Vorteile des US-Systems: große Forschungsinfrastrukturen und einen risikofreudigen Unternehmenssektor, unterstützt durch einen gewaltigen Privatkapitalmarkt. Meilensteinbasierte Public-private-Partnerships (PPPs) zwischen Privatunternehmen und nationalen Laboratorien stellen ein grundlegendes Instrument der Roadmap dar. Ihr „Build fast, iterate“-Ansatz ermöglicht es Privatunternehmen, verschiedene technologische Herausforderungen mit sehr ehrgeizigen Zeitzielen anzugehen.

Schlüsselmaßnahmen werden auf verschiedenen Zeitskalen definiert: Innerhalb der nächsten **2 bis 3 Jahre** soll die Testinfrastruktur zur Technologiedemonstration und Risikominimierung ausgebaut werden. In **3 bis 5 Jahren** sollen über das „Milestone-Based Fusion Development Program“ Unternehmen bei der Entwicklung von Fusionspilotanlagen gefördert werden. In **5 bis 10 Jahren** schließlich soll die **erste Generation nuklearer Fusionskraftwerke** entstehen und die groß angelegte Integration mit Schlüsseltechnologien wie den Blankets realisiert werden.

Insbesondere für die erste Phase spielen **internationale Kooperationen** eine wichtige Rolle. Nicht alle geplanten Infrastrukturen werden sich in den USA befinden: Für einige Bereiche (wie die Erbrütung und die Behandlung von Tritium) sieht die Roadmap vor, sich durch internationale Kooperationen mit führenden Laboratorien zu verbinden.

Europäische Union – langfristige, öffentlich koordinierte Fusionsforschung

Das Modell der Europäischen Union legt einen starken Fokus auf **öffentlich koordinierte Forschung** durch **die europäische Atomgemeinschaft Euratom via EUROfusion**, das europäische Konsortium für die Entwicklung von Fusionsenergie. Seit der Stilllegung von JET im Jahr 2023 hat Europa seine Strategie auf die Forschung an Tokamaks (unter anderem ASDEX Upgrade) und am Stellarator Wendelstein 7-X sowie auf die Vorbereitung des Betriebs von JT60-SA und **auf den Bau von ITER** ausgerichtet (EUROfusion, 2018).

Ein Programm basierend auf Wissenschaft, Technologie und Industrie soll langfristig den Übergang zum kommerziellen Einsatz von Fusionsenergie ermöglichen. Wesentlich ist hierfür der Bau der Anlage **IFMIF-DONES**, die Materialtests unter Beschuss von fusionsrelevanten Neutronen durchführt und bei entsprechender Ausrüstung auch Blankets qualifizieren könnte (Hernández et al., 2026). Die Strategie nach ITER wird derzeit diskutiert und überarbeitet – unter anderem, um dem jüngsten Aufschwung auf dem privaten Markt für Fusionsenergie angemessen begegnen zu können.

China – staatlich getriebene Großprojekte und Aufbau heimischer Lieferketten

China erzielt Fortschritte in mehreren Fusionsansätzen. Im Bereich Tokamak verfolgt es einen ähnlichen Weg wie die EU, nämlich über den derzeit im Bau befindlichen BEST Tokamak (Betriebsbeginn 2027) und mit dem geplanten „China Fusion Engineering Demo Reactor“ (CFEDR). Insbesondere soll der CFEDR **Energiegewinn sowie Tritium-Erbrütung** demonstrieren (International Atomic Energy Agency, 2025b). Damit verzichtet China auf eine volumetrische Neutronenquelle und verfolgt stattdessen einen gestuften Ansatz, bei dem die Blanket-Qualifizierung schrittweise in einer kraftwerksnahen Anlage mit steigender Leistung von etwa 200 bis 1.000 Megawatt erfolgt (Hernández et al., 2026). Gleichzeitig hat China mit der CRAFT Facility ein wichtiges Forschungs- und Testzentrum zur Entwicklung von Fusionstechnologien (Heizsysteme, Magneten, Divertor etc.) und für die Unterstützung des zukünftigen Betriebs von

Magnetfusionsreaktoren (wie CFETR) aufgebaut (Hefei Institutes of Physical Science und The Chinese Academy of Sciences, 2022).

Chinas anhaltende Investitionen in Großanlagen wie die **Zündanlage** ShenGuang-III und die **geplante Anlage ShenGuang-IV** verdeutlichen den Anspruch, langfristig eine führende Position in der Laserfusion einzunehmen.

Neue Industrieprojekte ergänzen das öffentliche Forschungs- und Entwicklungsprogramm Chinas. Diese zielen darauf ab, eine **inländische Lieferkette** für Fusionsbrennstoff und Schlüsselkomponenten aufzubauen. Exemplarisch sei hier **China Fusion Energy** genannt – ein staatlich unterstütztes Unternehmen, das von mehr als zwei Dutzend staatlichen Unternehmen und Forschungsinstituten mit einer Finanzierung von **mindestens 3 Milliarden US-Dollar** gegründet wurde (International Atomic Energy Agency, 2025b). Ein weiteres Beispiel ist der Hersteller von Hochtemperatursupraleitern **Shanghai Superconductors**, der bereits eine bedeutende Position auf dem globalen Markt einnimmt.

Frankreich – ITER-Gastgeber mit Doppelstrategie aus Magnet- und Laserfusion

Frankreichs Strategie ist **eng mit der europäischen verzahnt**. ITER wird im südfranzösischen Cadarache gebaut, womit Frankreich einen Großteil der Baukosten und Verantwortung für Endlagerung und Stilllegung nach dem Ende des Experiments trägt (ITER Organization, 2023a). Gleichzeitig führt die französische Atomenergiekommission CEA das nationale **Forschungs-Tokamak WEST** (CEA, 2025). Experimente in dieser Anlage sollen **wichtige Erkenntnisse für ITER** liefern, vor allem zur **Divertor-Technologie**.

Parallel zur magnetischen Fusion betreibt Frankreich bedeutende Trägheitsfusionsanlagen – dies unabhängiger von internationalen Kooperationen. Der **Laser Megajoule (LMJ)** wird, bei vollständiger Inbetriebnahme (voraussichtlich im Jahr 2026), die leistungsstärkste Laserfusionsanlage außerhalb der USA und stellt ein Kernstück der französischen Strategie zur Fusion dar. Ebenso wie viele US-Anlagen dient der LMJ hauptsächlich dem Bestandsmanagement der Kernwaffen (Department of Energy Office of Science, 2023); nur wenige Experimente konzentrieren sich daher auf zivile Energieanwendungen und werden der breiteren Öffentlichkeit mitgeteilt. Um die Entwicklung der Laser-Fusionsenergie weiter voranzutreiben, wurde 2025 das Unternehmen **GenF** durch eine Partnerschaft zwischen Industrie (Thales) und Forschungseinrichtungen (CNRS und CEA) gegründet.

Auch im Bereich der magnetischen Fusion treten neben staatlichen Einrichtungen zunehmend privatwirtschaftliche Akteure auf. Das Fusionsunternehmen **Renaissance Fusion** entwickelt ein auf Stellarator-Technologie basierendes Reaktorkonzept und erweitert damit die bislang stark institutionell geprägte Forschungslandschaft.

Frankreich lenkt die Industrie stark über staatliche Programme. Durch „France 2030“ zum Beispiel koordiniert die CEA 50 Millionen Euro zur **Entwicklung von Hochtemperatursupraleitern** für Fusionsmagneten. Das unterstreicht den Anspruch Frankreichs, nicht nur kompetitive Technologie, sondern auch **nationale Lieferketten** aufzubauen.

Vereinigtes Königreich – STEP als Treiber einer exportorientierten Fusionsindustrie

Das Vereinigte Königreich setzt in seiner Fusionsstrategie stark auf **öffentliche Leitprojekte, kombiniert mit Industriekooperationen**. Herzstück der Strategie ist das **STEP-Programm** (Spherical Tokamak for Energy Production) (Department for Energy Security & Net Zero, 2023). Hier wird die Regierung etwa 2,5 Milliarden Pfund über die nächsten 5 Jahre investieren, um **bis 2040 ein Prototypkraftwerk** zu bauen.

Das Programm wurde vor zehn Jahren als **anhaltende, langfristige Initiative** ins Leben gerufen, an der die Regierung, Forschungseinrichtungen, die Industrie und Start-ups beteiligt sind. Die Rolle der öffentlichen Finanzierung besteht darin, das Projekt zu gewährleisten sowie Stabilität und finanzielle Sicherheit zu garantieren, um Anreize für die Beteiligung privater Industriepartner zu schaffen. Langfristiges Ziel ist es, die **kommerzielle Nutzbarkeit von Fusionsanlagen** mittels eines Kraftwerks mit Nettoenergiegewinn zu demonstrieren. Derartige PPPs spiegeln die Strategie wider, eine **weltweit führende Fusionsindustrie** aufzubauen, die explizit verschiedene Fusionstechnologien unterstützt. Darüber hinaus soll das Fusionsökosystem in den kommenden Jahrzehnten in der Lage sein, Fusionstechnologie zu exportieren.

Nach der „Fusion Materials Roadmap 2.0“ (U.K. Atomic Energy Authority, 2025a) werden bereits Materialien und Komponenten unter STEP-relevanten Betriebsbedingungen untersucht, darunter Hochtemperatursupraleiter. In letzter Zeit hat das Vereinigte Königreich bedeutende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich des Tritium Handling und der Blanket-Technologie initiiert. Das Forschungsprogramm **LIBRTI** konzentriert sich insbesondere auf verschiedene Aspekte von Blankets mit niedriger Neutronenfluenz (von der Erbrütung bis zur Lithiumanreicherung), während die H3AT-Anlage **das Tritium Handling und Brennstoffkreisläufe** untersuchen wird.

Japan – Technologiehoheit und frühe kommerzielle Demonstration

Japan verfolgt mit der „Fusion Innovation Strategy“ eine auf **Technologieunabhängigkeit** ausgerichtete Roadmap (The Integrated Innovation Strategy Promotion Council, 2023). Die Regierung will kommerzielle Fusionskraftwerke früher realisieren, als andere Nationen es planen: Ziel ist es, in den 2030er Jahren eine **Tokamak-basierte Pilotanlage (FAST)** in Betrieb zu nehmen, die minimale Stromproduktion (10 Megawatt) nachweisen soll (FAST Project, 2024). 2023 wurde der **Fusionsindustrieverband („J-Fusion“)** gegründet, um Firmen miteinzubeziehen. Das japanische Unternehmen **Kyoto Fusioneering** ist eng im Projekt FAST eingebunden und arbeitet zudem unter anderem im Rahmen des Joint Ventures „Fusion Fuel Cycles Inc.“ gemeinsam mit der Forschungseinrichtung Canadian Nuclear Laboratories an der Testanlage UNITY-2 für den Brennstoffkreislauf (Kyoto Fusioneering, 2025).

3. Technologische Zwischenziele und Herausforderungen

Im vorangehenden Abschnitt wurde der Stand der Fusionsforschung und -technologie sowie der TRLs und internationaler Initiativen und Roadmaps präsentiert. Nun folgt die Demonstration zentraler Herausforderungen und Zwischenziele, die auf möglichen Wegen zu einem ersten deutschen Fusionskraftwerk zu überwinden beziehungsweise zu erreichen sind. Diese Ausführungen basieren auf Projektgruppensitzungen, thematischen Workshops, Experteninterviews und einer umfangreichen Literaturlauswertung.

Ziel der Analyse ist es, physikalische, technische und organisatorische Herausforderungen und Meilensteine zu benennen, um eine **Grundlage für die anschließende Ableitung der Handlungsoptionen** der technologischen Pfade (Magnetfusion, Laserfusion, Materialien und Brennstoff) zu schaffen.

Diese Analyse verdeutlicht, dass auf dem Weg zu einem Fusionskraftwerk noch **viele technologische Hürden** zu überwinden sind. Als besonders kritisch gilt die Entwicklung von gegen **Neutronenbestrahlung resistenten Materialien** und die **Erbrütung von Tritium**. Darüber hinaus bringt jeder Ansatz weitere, individuelle Probleme mit sich: Beim Tokamak bereitet vor allem die Kontrolle der **Plasmadisruptionen**

Schwierigkeiten, während beim Stellarator noch ungelöste Fragen zum **Plasmaeinschluss** bestehen. Und den größten technologischen Risikopunkt für die Laserfusion stellen die erforderlichen Fortschritte bei der **Entwicklung der Schlüsseltechnologien** – Lasersysteme und Targets – dar.

3.1 Magnetfusion

Tokamak

Wenn ein Tokamak ausreichend weit von seinen Operationsgrenzen entfernt arbeitet, sind stabile Plasmabedingungen leicht zu erreichen – in Ausnahmesituationen kann allerdings der Plasmastrom abreißen. Derartige Plasmodisruptionen sind mit hoher thermischer Belastung der Wände und großen mechanischen Kräften auf die umliegenden Strukturen verbunden und stellen derzeit noch eine große Herausforderung für den Tokamak dar (EUROfusion, 2018). Zwar ist der Tokamak technisch am weitesten fortgeschritten, aber solche Disruptionen könnten einen Showstopper für diese Technologie darstellen.

Energiegewinn nachweisen		Tokamak
<i>Voraussetzungen</i>	<i>Auswirkungen</i>	
Neue Tokamak-Anlagen (bspw. SPARC, BEST, CFEDR, ITER)	<ul style="list-style-type: none"> • Ausreichender Energiegewinn ermöglicht Stromerzeugung • Wesentliches Zwischenziel, um industrielle Beteiligung und Investitionen zu fördern 	

Der Tokamak hat bislang keinen Nettoenergiegewinn in einem brennenden Plasma nachgewiesen. Für den Einsatz in einem Kraftwerk muss darüber hinaus der Energiegewinn groß genug sein, um die Stromproduktion zu ermöglichen. Dies entspricht in etwa einem Gewinnfaktor von 50: Die Fusionsreaktionen setzen 50 Mal mehr Energie frei, als benutzt wird, um sie aufrechtzuerhalten.

Die Tokamak-Anlagen SPARC (Commonwealth Fusion Technologies), BEST und CFEDR (China) sowie ITER haben allesamt das Ziel, einen Nettoenergiegewinn nachzuweisen; dies soll zwischen 2027 (SPARC-Zeitplan) und den 2040er Jahren (ITER, CFEDR) erfolgen. SPARC und BEST sollen einen Nettoenergiegewinn im Plasma demonstrieren, ITER ein brennendes Plasma und CFEDR darüber hinaus eine Stromproduktion.

Szenarien zur Verlängerung der Pulse entwickeln		Tokamak
<i>Voraussetzungen</i>	<i>Auswirkungen</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Am Tokamak JT-60SA können Szenarien mit längeren Pulsen entwickelt werden • Erst durch ITER kann Tokamak als Wärmequelle auf TRL 7 gebracht werden 	Bessere Verlässlichkeit und Lebensdauer von Kraftwerk und Komponenten	

Bisher werden sämtliche Tokamaks pulsierend betrieben, ohne Ansatz zu einem kontinuierlichen Betrieb über Tage oder länger. Ein zukünftiges Großkraftwerk soll jedoch möglichst stationär beziehungsweise in sehr langen Pulsen in Betrieb sein. Der gepulste Betrieb führt zu zyklischen thermischen und mechanischen Belastungen, die Materialermüdung und strukturelle Schäden begünstigen können. Dies reduziert die

Verlässlichkeit sowie Verfügbarkeit des Kraftwerks deutlich und erhöht den Wartungsaufwand sowie die Kosten. Zudem ist ein Großkraftwerk schwerer ins Energiesystem integrierbar, wenn es große Mengen an Strom pulsierend einspeist.

Um diese Herausforderungen zu überwinden, werden beispielsweise am gerade in Betrieb gegangenen Tokamak JT-60SA Betriebsszenarien mit langen Pulsen entwickelt sowie weitere Optimierungsoptionen erprobt. Darüber hinaus liegt ein umfangreiches Wissen zu stationären und quasi-stationären Betriebsszenarien vor. Diese Erfahrungen bilden eine Grundlage für die Weiterentwicklung kraftwerksrelevanter Betriebsmodi.

Plasmainstabilitäten kontrollieren	Tokamak
<p><i>Voraussetzungen</i></p> <p>Verbesserte Plasmasteuerung, auch mithilfe von KI</p>	<p><i>Auswirkungen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Nahezu disruptionsfreie Plasmaszenarien für Kraftwerksbetrieb erforderlich • Höherer Energiegewinn und Wirtschaftlichkeit

Kraftwerksrelevante Plasmaszenarien müssen die Disruptionen im Normalbetrieb vermeiden. Randinstabilitäten führen zu großen Beschädigungen der Wandmaterialien, und Plasmadisruptionen beeinträchtigen die Sicherheit der Magneten, vor allem im Hinblick auf Quenches. So bleiben Disruptionen im Tokamak eine wesentliche Herausforderung, die für die Kommerzialisierung der Fusionsenergie gelöst werden muss.

Eine aktive Steuerung des Plasmas kann dazu beitragen, Disruptionen entweder zu vermeiden oder, falls sie unumgänglich sind, deren Folgen wirksam zu mildern. Neue KI-Werkzeuge können zur Früherkennung, Vermeidung und Mitigation von Disruptionen beitragen. Zudem werden Betriebsmodi erforscht, in denen Randinstabilitäten verhindert werden. Für einen Einsatz im Kraftwerkskontext bedarf es jedoch noch weiterer Entwicklungen.

Stellarator

Mehrere zentrale Fragen müssen auch auf dem Weg zu einem Stellarator-Kraftwerk gelöst werden. Bisher erlauben die aktuellen plasmaphysikalischen Modelle keine aussagekräftige Vorhersage bezüglich der Plasmaleistung im Maßstab eines Kraftwerks. Daneben sind die Divertor-Konzepte für Stellaratoren noch unzureichend entwickelt. Um den technologischen Weg zur Realisierung eines Stellarator-Kraftwerks zu ebnen, müssen diese Fragen zunächst angegangen werden. Einige Strategien zielen darauf ab, sie im Vorfeld zu klären – etwa durch Forschungsstellaratoren oder Technologiedemonstratoren –, andere schlagen vor, die Hürden direkt im Zuge der Entwicklung des Kraftwerkreaktors zu beseitigen.

Energiegewinn nachweisen und Plasmaeinschluss kraftwerksrelevant skalieren	Stellarator
<p><i>Voraussetzungen</i></p> <p>Stellarator mit deutlich höheren Einschluss-Parametern als Wendelstein 7-X</p>	<p><i>Auswirkungen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Energiegewinn (oder äquivalente Plasmaeinschluss-Parameter) nachgewiesen • Erreichen dieses Meilensteins wird wahrscheinlich industrielle Beteiligung und Investitionen fördern

Der Stellarator hat bisher noch keinen Energiegewinn nachgewiesen – ein solcher Nachweis gilt allerdings als grundlegendes, notwendiges Zwischenziel auf dem Weg zu einem Kraftwerk und ist auch strategisch wichtig, da das Erreichen dieses Meilensteins voraussichtlich industrielle Beteiligung und Investitionen fördern wird. Gleichzeitig lassen sich die derzeit verfügbaren experimentellen Ergebnisse zum Plasmaeinschluss nicht sinnvoll auf den Maßstab eines Kraftwerks übertragen, sodass weitere Daten benötigt werden, um den Plasmaeinschluss in einem Stellarator-Kraftwerk zuverlässig vorhersagen zu können. Eine zentrale Hürde besteht darin, dass der leistungsstärkste verfügbare Stellarator mit optimierter Magnetfeldgeometrie, Wendelstein 7-X, noch zu weit von Kraftwerksbedingungen entfernt ist und somit eine experimentell überprüfte Skalierung der Einschlusseigenschaften zu einem Kraftwerk fehlt.

Um diese Lücke zu schließen, wird ein Stellarator mit Einschlusseigenschaften zwischen Wendelstein 7-X und einer Anlage im Kraftwerksmaßstab benötigt – erreichbar über Größe beziehungsweise Magnetfeldstärke. Ein solches Gerät hätte das Ziel, Plasmaparameter nachzuweisen, die mit einem Energiegewinn kompatibel sind, verfügbare Vorhersagen zum Plasmaeinschluss zu testen und eine aussagekräftige Grundlage für deren Übertragung auf den Kraftwerksmaßstab zu schaffen. Darüber hinaus lässt sich ein großer Teil des beim Tokamak gewonnenen Wissens zur Plasmaphysik und Diagnostik auf den Stellarator übertragen. Auch ein Energiegewinn bei einem Tokamak wäre ausreichend, sofern beim Stellarator entsprechende Plasmaparameter erreicht werden.

Vorhersagemodelle und Codes	Stellarator
weiterentwickeln	
<i>Voraussetzungen</i>	<i>Auswirkungen</i>
Umfangreichere Datenlagen für Tokamak und Stellarator	<ul style="list-style-type: none"> • Erleichterte Wissensübertragung von Tokamak auf Stellarator • Beschleunigte Entwicklung der Plasmaphysik für den Stellarator

Zur Verbesserung der Vorhersagefähigkeit müssen numerische Methoden sowie Codes weiterentwickelt werden, um das Wissen von Tokamaks auf Stellaratoren zu übertragen und die bestehenden Modelle zu präzisieren.

Dabei kann ein großer Teil des beim Tokamak gewonnenen Wissens zur Plasmaphysik und Diagnostik genutzt werden; auch ein Energiegewinn bei einem Tokamak würde eine wichtige Referenz darstellen, sofern im Stellarator vergleichbare Plasmaparameter erreicht werden.

Wolfram für die erste Wand qualifizieren	Stellarator
<i>Voraussetzungen</i>	<i>Auswirkungen</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Stellarator mit kraftwerksähnlichem Plasma • Neutronenquellen und Labore mit Möglichkeiten zur Untersuchung von neutronenbeschädigten Materialien • Gegebenenfalls sind entsprechende Fortschritte beim Tokamak ausreichend für die Anwendung im Stellarator 	<ul style="list-style-type: none"> • Vorhersagen über die Lebensdauer der ersten Wand • Demonstration Plasmabetrieb mit Wolframwand

Wolfram muss als Material für die erste Wand im Kontext von Stellaratoren getestet und qualifiziert werden. Insbesondere ist sicherzustellen, dass Wolfram als Material der ersten Wand das Plasma nicht verunreinigt.

Ein Stellarator mit kraftwerksähnlichen Plasmabedingungen wird benötigt, um die Verunreinigungen zu prüfen. Fusionspezifische Neutronenquellen können die Materialbeständigkeit testen. Bei mehreren Entwicklungen, etwa bei Plasma zugewandten Materialien, der Plasmaheizung oder der Herstellung von Stahlstrukturen, ist jedoch das Erreichen von TRL 7 auf der Tokamak-Linie ausreichend für die Anwendung im Stellarator, sodass hier auf bestehende technologische Fortschritte zurückgegriffen werden kann.

Divertor hochskalieren	Stellarator
<i>Voraussetzungen</i>	<i>Auswirkungen</i>
Ein Stellarator mit kraftwerksähnlichen Plasmabedingungen und flexible Divertor-Geometrie	Kraftwerkstaugliche Lösung für Teilchenabfuhr

Der Divertor des Wendelstein 7-X ist derzeit das einzige verfügbare und bewährte Design für einen Stellarator-Divertor, kann jedoch nicht auf eine kraftwerksgerechte Lösung hochskaliert werden – insbesondere im Hinblick auf die Teilchenabfuhr. Das Testen von Divertor-Lösungen ist an Wendelstein 7-X nicht möglich, was eine wesentliche Hürde darstellt.

Neue Ansätze für einen „geschlossenen“ Divertor sollten daher in einem weiterentwickelten Stellarator getestet werden, was ausreichende Flexibilität im Design dieses Geräts erfordert. Simulationen und Modellierungen können den Designprozess unterstützen und sind zudem notwendig, um entwickelte Konzepte auf ihre Reaktorrelevanz zu prüfen.

Supraleiter

Für eine Fusionsreaktion sind Einschluss und Aufrechterhaltung des Plasmas über starke Magnetfelder entscheidend. Zur Erzeugung dieser Magnetfelder werden supraleitende Spulen benötigt, die die notwendigen hohen Ströme innerhalb der Spulen ohne Verluste durchfließen lassen. Niedrigtemperatursupraleiter (LTS) werden bereits seit Langem in Tokamaks und Stellaratoren eingesetzt und sind in ihrer Entwicklung weit fortgeschritten. Dem gegenüber stehen Hochtemperatursupraleiter (HTS), die auch bei höheren Betriebstemperaturen eingesetzt werden und stärkere Magnetfelder in kompakten Spulen generieren können. HTS-Spulen befinden sich für Fusionsanwendungen noch auf einem niedrigen technologischen Reifegrad; bislang wurden einzelne Spulen demonstriert, jedoch noch keine vollständig integrierten Spulensysteme unter realistischen Fusionsbedingungen betrieben.

Sicherheit der Magneten für Reaktorbetrieb prüfen	Supraleiter
<i>Voraussetzungen</i>	<i>Auswirkungen</i>
Durchführung von Tests, unter anderem unter Neutronenbestrahlung, um Informationen über Veränderungen der Mikrostruktur der Materialien zu erhalten	Bewertung von Quench-Sicherheit, Lebensdauer und Einsatzfähigkeit im Reaktorbetrieb

Die Quench-Sicherheit der Magneten, ob einzeln oder als gekoppelte Systeme, muss nachgewiesen werden.

Zugleich gilt es, die Neutronenresistenz der supraleitenden Materialien systematisch zu prüfen. Neutroneneinfluss verändert durch Änderungen der Mikrostrukturen die mechanische Stabilität, die supraleitenden Eigenschaften und die Quench-Anfälligkeit der Magneten.

Eine Entwicklungsstrategie sieht vor, Magnetspulen schrittweise in wachsender Größe zu testen. Größere Spulen erfordern zusätzliche Testanlagen sowie gezielte Bestrahlungstests, um Materialveränderungen systematisch zu untersuchen. Ergänzend sollten Technologien entwickelt werden, die Quench-Risiken aktiv kontrollieren und begrenzen.

Kühlsysteme weiterentwickeln	Supraleiter
<i>Voraussetzungen</i>	<i>Auswirkungen</i> <ul style="list-style-type: none"> • Verlässlichkeit der Magneten • Überwindung möglicher Engpässe in Kühlmitteln (insbesondere Helium)

Um einen stabilen Betrieb zu gewährleisten, müssen die Kühlsysteme für HTS und LTS verbessert werden. Bei HTS gelingt es den aktuellen Systemen nicht, die entstehende Wärme ausreichend abzuführen – das beeinträchtigt sowohl die Pulsströme als auch die Supraleitfähigkeit. Bei LTS sind die Kühlsysteme hingegen extrem teuer, und mit der wachsenden Zahl an Fusionskraftwerken könnte das benötigte Helium knapp werden. Besonders wichtig ist die Entwicklung einer dynamischen Kühlung, die auf thermische Störungen reagiert und so die Stabilität der Supraleiter sichert.

Die Kühlsysteme müssen technologisch weiterentwickelt werden. Eine gezielte Finanzierung ist nötig, um diesen Prozess zu beschleunigen.

Fertigung der Magnete hochskalieren	Supraleiter
<i>Voraussetzungen</i> Ausbau europäischer Versorgung mit seltenen Erden, etwa REBCO, und HTS-Bändern	<i>Auswirkungen</i> <ul style="list-style-type: none"> • Reduktion der Abhängigkeit vom Ausland hinsichtlich seltener Erden – das führt zu stabilen Lieferketten auch in politisch angespannten Zeiten • Erfüllung der in den 2030er Jahren erwarteten hohen Nachfrage

Um HTS- und LTS-Komponenten industriell einzusetzen, muss ihre Fertigung deutlich hochskaliert werden. Eine zentrale Schwierigkeit besteht darin, lange HTS-Bänder herzustellen und Spulen zu wickeln – besonders bei den komplexen Geometrien des Stellarators. Hinzu kommen Herausforderungen hinsichtlich Verfügbarkeit und den Kosten von Strukturmaterialien. Die europäische Versorgung mit seltenen Erden, vor allem für REBCO-basierte Materialien, bleibt geopolitisch kritisch und teils von außereuropäischen Lieferketten abhängig.

Eine Produktion in Deutschland oder Europa ist zwar möglich, erfordert jedoch den Ausbau von Robotik, geeigneten Fertigungsstätten und stabilen Lieferketten. Um die Materialabhängigkeit weiter zu verringern, könnten in Europa eisenbasierte Supraleiter vorangetrieben werden. Gleichzeitig muss die europäische Versorgung mit REBCO und HTS-Bändern gezielt ausgebaut werden.

Gyrotrons für Plasmaheizung

In der Magnetfusion wird das Plasma unter anderem durch Hochleistungsradiowellen bestimmter Resonanzfrequenzen erhitzt. **Gyrotrons** sind dabei von besonderer Bedeutung, weil sie Radiowellen – und somit Energie – gezielt an bestimmte Stellen liefern. Dadurch eignen sich Gyrotrons sowohl zur **Plasmaheizung** als auch zur **Kontrolle der Plasmastabilität**.

Es sind erhebliche industrielle Anstrengungen erforderlich, um den großflächigen Einsatz von Gyrotrons zu ermöglichen. **Niederfrequenz-Gyrotrons (etwa 170 Gigahertz)** kommen bereits in großvolumigen Reaktoren wie ITER oder Wendelstein 7-X zur Anwendung – und sind somit entwickelt und grundsätzlich verfügbar. Dennoch sind sie kostenintensiv und mit sehr langen Lieferzeiten verbunden. Für kompakte Hochfeldreaktoren sind **Hochfrequenz-Gyrotrons (etwa 250 Gigahertz)** erforderlich, die sich allerdings noch in der Entwicklung befinden.

Gyrotrons für kompakte Maschinen entwickeln	Gyrotrons
<i>Voraussetzungen</i>	<i>Auswirkungen</i> Effiziente Plasmaheizung und -steuerung für kompakte Maschinen

Für kompakte Fusionsanlagen sind Gyrotrons nötig, die bei 250 Gigahertz etwa 1 Megawatt leisten; die Herausforderung liegt weniger in der Konzeption als vielmehr in der Fertigung. Alternativ lassen sich andere Methoden zur Plasmaheizung nutzen, doch das verzögert die Inbetriebnahme der Anlage, weil es umfangreicher Umgestaltungen bedarf.

Oft arbeiten Fusionsunternehmen mit etablierten Gyrotron-Herstellern zusammen, um neue Konzepte zu erarbeiten. Erste Prototypen aus bestehenden Kooperationen sollen in 2 bis 3 Jahren vorliegen.

Fertigungskapazitäten für Gyrotrons erhöhen	Gyrotrons
<i>Voraussetzungen</i> Anreize in der Industrie	<i>Auswirkungen</i> Deutlich reduzierte Zeiten und Kosten zum Bau und Betrieb eines ersten Kraftwerks

Ein Kraftwerk mit 1 Gigawatt elektrischer Leistung benötigt 50 bis 70 Gyrotrons à 1 Megawatt – weit mehr, als die derzeitige weltweite Produktion hergibt (schätzungsweise 10 bis 15 Geräte pro Jahr). Die Marktkonzentration erschwert die Lage: Nur wenige Anbieter decken den Bedarf, darunter Thales (Frankreich), Canon und Kyoto Fusionengineering (Japan) sowie GYCOM (Russland, derzeit für den Westen nicht verfügbar).

Um die Fertigung auszuweiten und die Stückkosten zu senken, bedarf es gezielter Anreize für die Industrie. Partnerschaften und finanzielle Unterstützung können den Aufbau einer skalierbaren Produktionsinfrastruktur beschleunigen.

3.2 Laserfusion

Laser Drivers

Laser Drivers müssen die Energie für die Zündung der Targets präzise, zuverlässig und mit hoher

Wiederholungsrate liefern. Zwar können einige Systeme bereits die nötigen Energien erreichen, doch ihre Betriebsparameter bleiben weit hinter den Anforderungen eines Kraftwerks zurück – vor allem Wiederholungsrate, Effizienz und mittlere Leistung der Lasersysteme müssen deutlich gesteigert werden. Gleichzeitig müssen zentrale Komponenten wie Pumpdiolen, Verstärker und großformatige optische Elemente langlebiger und robuster werden, um einen dauerhaften Kraftwerksbetrieb zu gewährleisten. Auch die industrielle Fertigung dieser Komponenten stellt eine Herausforderung dar, da insbesondere die Produktion von Laserdioden und großformatigen Optiken noch nicht auf die für ein Kraftwerk erforderlichen Stückzahlen ausgelegt ist.

Wiederholungsrate, Energieleistung und Effizienz der Laser auf Kraftwerksniveau steigern		Lasertreiber
<i>Voraussetzungen</i>	<i>Auswirkungen</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung von Kernkomponenten (Pumpdiolen, Kristalle, Optiken) für DPSS-Laser • Gasbasierte Excimerlaser aus der Halbleiterindustrie und aus dem Verteidigungsbereich für die Laserfusion tauglich machen 	<ul style="list-style-type: none"> • Entscheidung zum Zündungsansatz • Entscheidung zur Lasertechnologie • Kraftwerkstauglicher Laserparameter (Energie, Effizienz, Wiederholungsrate) 	

Ein Laserfusionskraftwerk muss mindestens mit 0,25 – 20 Hertz arbeiten, also 10 Mal pro Sekunde Targets zünden (Häfner et al., 2023; Wurbs et al., 2024). Bei jedem Schuss muss ein Lasersystem Energie im Megajoule-Bereich liefern können. Laser in der NIF-Anlage schaffen derzeit nur wenige Schüsse pro Tag und müssen danach gekühlt und gewartet werden. Um das Ziel erreichen zu können, müsste die Wiederholungsrate etwa millionenfach erhöht werden. Neben der Wiederholungsrate und der Energie des Lasers muss auch die Wallplug-Effizienz für ein funktionsfähiges Laserfusionskraftwerk verbessert werden. Die zentrale Herausforderung bei der Entwicklung von Lasertreibern für Kraftwerke ist die gleichzeitige Realisierung von hoher Pulsenergie und hoher Wiederholungsrate. Während Systeme wie die am NIF (USA) oder am LMJ (Frankreich) bereits benötigte Energien aufweisen, scheitern sie an der notwendigen Wiederholungsrate aufgrund mangelnder thermischer Kontrolle. Die Diode-Pumped-Solid-State-Lasers (DPSSL) weisen eine hohe Wiederholungsrate und einen effizienten Wärmeabtransport auf, operieren jedoch derzeit noch in niedrigeren Energieklassen. Die für ein Fusionskraftwerk erforderliche Hochskalierung der Energie wurde durch modulare Konzepte vorgezeichnet. Die Realisierung blieb jedoch bisher aus Kostengründen aus.

In Bezug auf eine mögliche Lösungsmethode gelten DPSSL als vielversprechend, da diese Festkörperlaser ausreichend Energie bei erforderlicher Wiederholungsrate liefern könnten (Häfner et al., 2023). Darüber hinaus könnten DPSSL durch ihre modulare Bauweise potenziell vorteilhaftere Wartungsintervalle bieten und eine steile Kostendegression bei den Pumpdiolen versprechen. Daneben könnten gasbasierte Excimerlaser eine Lösungsmethode darstellen. Diese bieten physikalische Vorteile, insbesondere für den Direct Drive-Ansatz. Das Konzept des Fusionsunternehmens Xcimer Energy beispielsweise basiert auf diesen Lasern (Galloway, Valys und Sutter, 2026). Außerdem ist aktuell die Produktion der Excimer-Lasers im Vergleich zu der von DPSSL kostengünstiger, obwohl letztere dank der Skaleneffekte voraussichtlich die Kostenvorteile ausgleichen können.

Lebensdauer und Zuverlässigkeit der Laserkomponenten steigern	Laser Drivers
<i>Voraussetzungen</i> Anlagen für Accelerated Lifetime Tests	<i>Auswirkungen</i> <ul style="list-style-type: none"> • Schwachstellen oder Fehlfunktionen sowie das Risiko von Ausfällen in der Zukunft verringern sich • Trainingsdaten für Machine Learning Tools

Die Laserkomponenten, insbesondere Verstärker und optische Elemente, müssen langlebiger und zuverlässiger werden, um den Anforderungen eines kommerziellen Kraftwerks gerecht zu werden (Häfner et al., 2023). Für den reibungslosen Langzeitbetrieb von Laserfusionskraftwerken sind erhebliche Fortschritte bei der Entwicklung strahlungsbeständiger Gläser und optischer Elemente erforderlich – dies gilt insbesondere für die Endoptik in der Nähe der Reaktionskammer: Diese Komponenten müssen in großen Formaten und großen Stückzahlen verfügbar sein. Hürden liegen derzeit in der Fertigung von strahlungsbeständigen Großoptiken. Konkret weist die wirtschaftliche Herstellung, also die Fertigung mit der erforderlichen hohen Genauigkeit, Präzision, Wiederholbarkeit, Geschwindigkeit und Stückzahl Entwicklungsbedarf auf (Häfner et al., 2023).

Im Rahmen von „Accelerated Lifetime Testing“ (beschleunigte Lebensdauertests) werden Komponenten, insbesondere Großoptiken, höheren Betriebsbedingungen und Belastungen ausgesetzt als in einer Fusionsanlage. Dadurch können Fehlfunktionen oder Schwachstellen aufgedeckt werden, wodurch das Risiko zukünftiger Ausfälle geschmälert wird. Daneben bietet das Verfahren Testumgebungen, in denen Erfahrungen zum Betrieb Hochenergielasern gesammelt werden können. Außerdem können Trainingsdaten für Machine Learning Tools gesammelt werden. Für Accelerated Lifetime Tests ist eine spezielle Versuchsanlage erforderlich (Häfner et al., 2023).

Produktion von Dioden-Laserpumpmodulen hochskalieren	Laser Drivers
<i>Voraussetzungen</i>	<i>Auswirkungen</i> <ul style="list-style-type: none"> • Herstellung von Lasern für Fusionskraftwerk ist wirtschaftlich • Anwendung von effizienten, hochenergetischen Lasersystemen außerhalb der Fusion • Hocheffiziente Produktionstechnik für optische Systeme (Erschließung neuer Märkte)

Effiziente, hochenergetische Lasersysteme finden zwar Anwendungsmöglichkeiten auch außerhalb der Fusion, allerdings reicht die Nachfrage aus diesen Sektoren nicht, um die Entwicklung und Skalierung von Dioden voranzutreiben. Aus diesem Grund sind Pumplaserdioden derzeit zu teuer für den Einsatz in einem Fusionskraftwerk. Die Produktion von Dioden muss erhöht werden, um die erforderliche Nachfrage für DPSSL decken zu können und die Kosten zu senken.

Dementsprechend sind Anreize und Investitionen in Fertigungskapazitäten notwendig, um die Produktionsmenge zu steigern und die Lasersysteme wirtschaftlich realisierbar zu machen.

Targets

Die Targets enthalten den Fusionsbrennstoff und bilden das Herzstück der Energiegewinnung in der Laserfusion. Ihre präzise Herstellung und sorgfältige Handhabung sichern einen zuverlässigen wie effizienten Kraftwerksbetrieb. Während heutige Experimente einzelne Targets unter kontrollierten Laborbedingungen herstellen lassen und nutzen, müsste ein Kraftwerk große Mengen gleichbleibend hochwertiger Targets automatisch fertigen. Die verwendeten Materialien dürfen die Reaktionskammer nicht beschädigen, etwa durch Ablagerungen, und müssen mit dem Brennstoffkreislauf kompatibel sein.

Target-Fertigung entwickeln und automatisieren	Targets
<i>Voraussetzungen</i>	<i>Auswirkungen</i>
Weiterentwicklung der Target-Konzepte	<ul style="list-style-type: none"> • Entscheidung zum Zündungsansatz • Entscheidung zum Target-Design • Präzisionsfertigung mit vollautomatisierter Herstellung und Qualitätskontrolle. •

Ein Kraftwerk verbraucht fast eine Million Targets pro Tag. Diese müssen extrem präzise gefertigt sein, da selbst kleinste Fehler den Energiegewinn mindern oder die Zündung scheitern lassen. Die einzigen derzeit verfügbaren Targets (die vom NIF) werden einzeln, über Wochen hinweg und zu enormen Kosten erstellt. Nur ein kleiner Teil eignet sich letztlich für Experimente, die Mehrheit wird verworfen. Dieser Produktionsansatz eignet sich daher nicht für einen Kraftwerksbetrieb. Neue Konzepte für die Target-Fertigung sind benötigt, die nicht mehr auf maximale Flexibilität sondern auf eine standardisierte Massenproduktion abzielen.

Es bedarf neuer Target-Designs und entsprechende Fertigungstechnologien sind nötig, um eine industrielle Massenproduktion zu ermöglichen. Verfahren wie Mikroverkapselung („Microencapsulation“) oder Zwei-Photonen-Polymerisation („Two-Photon Polymerisation“) werden erforscht, stecken jedoch noch in den Anfängen.

Target-Kosten senken	Targets
<i>Voraussetzungen</i>	<i>Auswirkungen</i>
Target-Design definiert	Wirtschaftliche Effizienz des Kraftwerksbetriebs

Die Targets für NIF kosten pro Stück Zehntausende Euro, was allerdings aus den spezifischen Bedingungen für die wissenschaftliche Grundlagenforschung am NIF resultiert. Daher sind diese Kosten nicht repräsentativ für künftige Kraftwerksbedingungen. Neue, kraftwerktaugliche Target-Designs müssen Kosten von einigen Cent pro Target ermöglichen. Welche Stromquelle die Fusion im Energiesystem ersetzen soll – etwa Gaskraftwerke oder erneuerbare Energien – bestimmt die Zielkosten für die Stromerzeugung aus Fusion und dadurch auch für die Target-Herstellung.

Target-Verarbeitung in den Brennstoffkreislauf integrieren	Targets
<i>Voraussetzungen</i>	<i>Auswirkungen</i>

<ul style="list-style-type: none"> • Target-Design definiert • Zündungsansatz gewählt 	Kontinuierliche und stabile Brennstoffversorgung fürs Kraftwerk.
---	--

Die Fertigung von Targets sowie die Verarbeitung der Nebenprodukte aus der Fusionsreaktion müssen in den Brennstoffkreislauf integriert und darin kontrollierbar sein. Die Targets müssen mit Deuterium und Tritium automatisch befüllt zumindest kurzfristig gelagert werden. Hochautomatisierte Verfahrenstechniken und Spezialmaschinenbau, die das mit der nötigen Rate hochzuverlässig und hochsicher gewährleisten, existieren nicht. Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass Materialien der Target-Kapsel – vor allem kohlenstoffbasierte – nach der Zündung mit dem Brennstoff reagieren. Das erschwert die Einbindung in einen geschlossenen Kreislauf, weil diese Verbindungen gelöst werden müssen, um Brennstoff (insbesondere Tritium) zurückzugewinnen.

Technologien für die Fertigung von Targets müssen entwickelt werden, um sowohl die Handhabung als auch die Wiederaufbereitung von Brennstoff zuverlässig zu ermöglichen.

Zuverlässige Target Injection realisieren	Targets
<i>Voraussetzungen</i> Testanlage für Target-Injektion	<i>Auswirkungen</i> Verlässliche und reproduzierbare Zündung mit 10-Hertz-Schussfrequenz

Targets müssen schnell und präzise in die Reaktionskammer eingeschossen werden. Die meisten Konzepte setzen derzeit auf kryogenen Brennstoff. Diese gekühlten Targets müssen den heißen Bedingungen der Reaktionskammer bis zur Zündung standhalten. Während Single-Shot-Injektoren bei Raumtemperatur bereits erprobt wurden, befinden sich vollständig kryogene Injektoren, die automatisch und kontinuierlich mit kryogenen Targets geladen werden, noch in der Planungsphase (Häfner et al., 2023).

Präzise Target-Tracking- und Synchronisationssysteme entwickeln	Targets
<i>Voraussetzungen</i> Zündungsansatz definiert	<i>Auswirkungen</i> Präziser Laserbeschuss zur verlässlichen und reproduzierbaren Zündung

Jeder Laserschuss muss exakt abgestimmt sein, damit das Target gleichmäßig und gleichzeitig aus allen Richtungen bestrahlt wird. Dafür ist eine präzise Verfolgung des Targets und Synchronisation mit dem Laserschuss unerlässlich.

Tests für diesen Prozess, das sogenannte Target Engagement, müssen noch auf kraftwerksrelevante Geschwindigkeiten, Laserstrahl-Durchmesser und Entfernungen angepasst werden.

Ablagerungen durch Materialien aus dem Target untersuchen und beherrschen	Targets
<i>Voraussetzungen</i> <ul style="list-style-type: none"> • Laser-Technologie ausgewählt • Target Design definiert 	<i>Auswirkungen</i> <ul style="list-style-type: none"> • Verlängerte Lebensdauer der Optiken und der Reaktionskammer

- Erhöhte Effizienz des Lasers und der Fusionsreaktion
- Vermeidung radioaktiver Abfälle

Nach der Zündung deponieren sich Materialien aus dem Target an den Wänden der Reaktionskammer und den optischen Elementen des Lasers ab. Beim Indirect-Drive verschlimmern zusätzliche Stoffe aus dem Hohlraum diese Ablagerungen noch weiter. Die Rückstände können die Endoptik schädigen, die Effizienz der Laserbeheizung verringern und die Handhabung des Brennstoffkreislaufs erschweren.

Um Ablagerungen zu minimieren und ihre Folgen zu kontrollieren (sogenannte „Debris-Mitigation“) – insbesondere aktivierte Materialien zu vermeiden –, müssen die Target-Materialien gezielt ausgewählt und geeignete Reinigungskonzepte entwickelt werden.

Laser-Target Interaktion und Zündung

Der Energiegewinn aus der Zündung des Fusionsbrennstoffs hängt entscheidend davon ab, wie Laser und Target zusammenwirken. In den letzten Jahren gab es in diesem Bereich große Fortschritte, etwa durch erfolgreiche Zündungsexperimente an großen Forschungsanlagen (siehe Kapitel 2.3). Doch die freigesetzte Energie reicht weder in Menge noch in Zuverlässigkeit für den Betrieb eines Kraftwerks aus. Schon kleinste Änderungen an Laser- oder Target-Parametern führen zu erheblichen Schwankungen im Energiegewinn. Zudem lassen sich die Ergebnisse bisheriger Versuche nur begrenzt auf andere Zündungsansätze übertragen. Erschwerend kommt hinzu, dass heutige Simulationen die komplexe Physik der Laser-Plasma-Interaktion noch nicht zuverlässig abbilden. Für die Weiterentwicklung der Laserfusion sind daher ein tieferes Verständnis der Implosion und präzisere, experimentell überprüfte Simulationen erforderlich.

Energiegewinn steigern und stabilisieren	Laser-Target Interaktion und Zündung
Voraussetzungen Testanlage für Laser-Target-Interaktion	Auswirkungen <ul style="list-style-type: none"> • Grundlagen zur Entscheidung über Lasertechnologie • Grundlagen zur Entscheidung über Target-Design • Grundlagen zur Entscheidung über Zündungsansatz

Die erfolgreiche Demonstration der Zündung am NIF hat das fundamentale physikalische Prinzip der Trägheitsfusion validiert und damit den Weg für die technologische Skalierung geebnet. Allerdings müssen sowohl die Höhe als auch die Zuverlässigkeit des am NIF erzielten Energiegewinns („Target Gain“) für den Kraftwerksbetrieb deutlich erhöht werden. Die aktuelle Variabilität im Energiegewinn verdeutlicht dabei das enorme Optimierungspotenzial: Da kleine Änderungen an Laser- beziehungsweise Target-Parametern den Energiegewinn von Versuch zu Versuch stark schwanken lassen (Lawrence Livermore National Laboratory, 2025), wird die präzise Kontrolle der Laser-Plasma-Interaktion höhere Gain-Werte ermöglichen. Die am NIF mit dem Indirect-Drive-Verfahren erzielten Ergebnisse lassen sich allerdings kaum auf andere Ansätze wie Direct Drive, Fast Ignition oder Shock Ignition übertragen.

Ein entscheidender Beschleuniger für diese Entwicklung ist der Einsatz von Machine-Learning-Algorithmen und hochauflösenden Rad-Hydro-Simulationen, die bereits heute die Vorhersagegenauigkeit massiv erhöhen.

Testanlagen mit hoher Wiederholungsrate können die Ergebnisse von Simulationen validieren und langfristig die Zündung von einem wissenschaftlichen Durchbruch zu einem robusten, industriell steuerbaren Prozess machen.

Validierte Rad-Hydro-Simulationscodes entwickeln	Laser-Target Interaktion und Zündung
<p><i>Voraussetzungen</i></p> <p>Datenbasis erweitern für Validierung der Simulation</p>	<p><i>Auswirkungen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Zuverlässige Simulationen • Optimierung und Stabilität des Energiegewinns • Minderung von Fehlversuchen • Grundlagen für Entscheidungen über Zündungsansatz und Target-Design

Selbst modernste Simulationscodes können experimentelle Ergebnisse noch nicht präzise vorhersagen, was die Fortschritte in der Laserfusion ausbremst. Eine zentrale Herausforderung für die zivile Laserfusionsforschung ist die eingeschränkte Verfügbarkeit hochpräziser Simulationsdaten. Grund dafür ist, dass viele Benchmark-Ergebnisse und Codes im Bereich der nationalen Sicherheit entstanden sind und dadurch nicht zugänglich sind.

Es braucht einen strahlungs-hydrodynamischen Simulationscode („Rad-Hydro-Code“), der durch Experimente überprüft und der Fusionsforschung zugänglich gemacht wird. Besonders vielversprechend ist der Einsatz von Machine Learning, was die Vorhersagegenauigkeit solcher Codes deutlich steigern kann. Besonders vielversprechend ist hierbei die Integration von Machine Learning, um die komplexe Physik von Laser-Plasma-Instabilitäten effizienter abzubilden. Damit wird die Lücke zwischen theoretischen Modellen und experimentellen Daten geschlossen.

3.3 Materialien und Brennstoff

Materialien

Ohne geeignete Materialien kann ein Fusionskraftwerk nicht zuverlässig – wenn überhaupt – betrieben werden. Diese Materialien müssen extremen Temperaturen und intensiver Strahlung, vor allem hochenergetischen Neutronen, standhalten. Die derzeit verfügbaren Materialien sind zwar für einen Demonstrator zur Stromerzeugung ausreichend, nicht aber für ein kommerzielles Kraftwerk. Fehlende Infrastruktur erschwert die Materialprüfung und wird zum kritischen Engpass; dafür sind IFMIF-DONES und andere Neutronenbestrahlungsanlagen wesentlich. Zudem bestimmen die Materialien das Abfallaufkommen: Der radioaktive Abfall von Fusionskraftwerken entsteht vor allem durch aktivierte Stoffe. Konzepte für Entsorgung und Wiederverwendung sind dringend erforderlich.

Neutronenbeständigkeit testen	Materialien
<p><i>Voraussetzungen</i></p> <p>Fusionsspezifische Neutronenquellen</p>	<p><i>Auswirkungen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Qualifizierung von Materialien für den Einsatz in Kraftwerken

- Zuverlässige Schätzung der Lebensdauer von Komponenten

Die aktuelle Datenlage erlaubt verlässliche Aussagen zur Materialbeständigkeit der ersten Wand lediglich für wenige Jahre. Bei der Laserfusion sind darüber hinaus die Auswirkungen kurzer, intensiver Neutronenpulse kaum erforscht.

Daten aus IFMIF-DONES und anderen Bestrahlungsanlagen mit fusionsspezifischen Neutronen sind unverzichtbar. Bis diese verfügbar sind, könnten Protonenbestrahlungen frühe Materialtests beschleunigen, auch wenn ihre Ergebnisse nur begrenzt auf Neutronenbestrahlung übertragbar sind. Künstliche Intelligenz kann, bei ausreichend vorliegender Datenlage, die Entwicklung neuer Materialien vorantreiben; konkret kann dies etwa durch die systematische Untersuchung breiter Parameterbereiche erfolgen. Da die Datenlage zu Neutroneneffekten aufgrund der derzeit noch fehlenden fusionsspezifischen Neutronenquellen allerdings nicht umfangreich ist, ist die Wirksamkeit der KI in diesem Bereich an Entwicklungen zur Datenlage geknüpft.

Fertigung von Fusionsstählen hochskalieren	Materialien
<p><i>Voraussetzungen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Infrastruktur wie dedizierte Hochöfen, um Verunreinigung zu vermeiden • Spezialisierung einiger Hersteller auf Fusionsstähle 	<p><i>Auswirkungen</i></p> <p>Lieferkette und Fertigungskapazitäten für wesentliche Strukturmaterialien erhöht</p>

Der Bau eines Fusionskraftwerks erfordert Tausende Tonnen niedrig aktivierbaren Stahl wie Eurofer – dies ist derzeit die einzig praktikable Option, da Alternativen als unzuverlässig gelten. Doch die bestehenden Produktionskapazitäten und Lieferketten für Eurofer reichen bei Weitem nicht aus. Bei der Herstellung großer Mengen treten zudem Verunreinigungen wie Kobalt und Nickel auf, die langlebige radioaktive Abfälle erzeugen und die Skalierung erschweren.

Die Produktion in großem Maßstab verlangt spezielle Infrastruktur, etwa eigens dafür ausgelegte Hochöfen, um Verunreinigungen zu vermeiden. Dies wiederum ist mit einem erheblichen industriellen Aufwand verbunden und wird voraussichtlich eine Spezialisierung einzelner Hersteller auf Fusionsstähle nötig machen.

Fertigung und Lieferkette für Wolfram hochskalieren	Materialien
<p><i>Voraussetzungen</i></p> <p>Lieferketten innerhalb Europas verstärken, um Abhängigkeiten zu vermeiden</p>	<p><i>Auswirkungen</i></p> <p>Gesicherte Versorgung mit kritischem Baumaterial für erste Wand.</p>

Wolfram eignet sich am besten für die erste Wand von Reaktionskammern, da es extremen Temperaturen und Neutronenbestrahlung standhält. Doch seine Verarbeitung ist schwierig: Platten zu fertigen, sie an die Stahlstruktur zu montieren und mit Kühlschichten zu verbinden, geht mit einem hohen technischen Aufwand einher. Die Mehrheit des produzierten Wolframs findet in der Wirkmittelindustrie, der Rest hauptsächlich im militärischen und medizintechnischen Bereich Anwendung. Die aktuell angespannte Lage in der Rüstungsindustrie stellt einen weiteren Wettbewerbsfaktor in Bezug auf die Versorgung mit Wolfram dar.

Hinzu kommt eine stark konzentrierte Lieferkette – China kontrolliert rund 80 Prozent der Weltproduktion, was die Versorgung unsicher macht. Der Mangel an alternativen Materialien verschärft die Lage weiter.

Sicherheitskonzept für die Abfallentsorgung formulieren		Materialien
Voraussetzungen <ul style="list-style-type: none"> Regulierungsrahmen zu radioaktiven Abfällen in Fusionskraftwerken Daten über Materialaktivierung durch fusionspezifische Neutronen 	Auswirkungen <ul style="list-style-type: none"> Planungs- und Betriebssicherheit gewährleisten Erleichterte gesellschaftliche Akzeptanz 	

Fusionskraftwerke erzeugen große Mengen radioaktiven Abfalls, vor allem aus der ersten Wand und anderen In-vessel-Komponenten. Der entstehende Abfall ist dabei überwiegend schwach- bis mittelradioaktiv, mit Halbwertszeiten im 100-Jahre-Bereich; die genaue Menge hängt wesentlich von der geplanten Lebensdauer der Komponenten ab. Eine Entsorgungskette fehlt bislang. Dabei sollen Wiederverwendung, Recycling und Stilllegung eingeplant werden – nicht nur für den Normalbetrieb, sondern auch für Notfälle wie einen Kühlausfall.

In Ländern mit starker Ablehnung gegenüber Kerntechnologien müssen realistische Erwartungen zur Menge hochradioaktiven Abfalls gesetzt werden. Klare Entsorgungswege müssen definiert und offengelegt werden (geschätzter Zeitrahmen: 2028). Abfallentsorgung und Sicherheit sind dabei eng mit den zuständigen Regulierungs- und Genehmigungsbehörden abzustimmen. Datenbanken über Sicherheits- und Zuverlässigkeitsbewertungen sollen den Kraftwerksbauern und -entwicklern zur Verfügung gestellt werden.

Blankets

Die Blankets übernehmen drei zentrale Aufgaben im Fusionskraftwerk: Zum einen wandeln sie die Bewegungsenergie der Fusionsneutronen in Wärme um. Daneben wird das für den Kraftwerksbetrieb notwendige Tritium durch die Reaktion von Lithium, das im Blanket enthalten ist, mit Neutronen erzeugt. Mit diesen beiden Funktionen schützen Blankets das restliche Kraftwerk vor Neutronen und bewahren Materialien wie Menschen vor den Strahlungen des Kraftwerks.

Wärmeabfuhr und Wärmeübertragung der Blankets kontrollieren		Blankets
Voraussetzungen	Auswirkungen Effizienzsteigerung für das Kraftwerk	

Die Wärmeübertragungseigenschaften der Blankets, einschließlich der Wechselwirkungen zwischen Breeder-Materialien und Strukturmaterialien, müssen geprüft werden. Die Wärmeübertragung der Blankets ist entscheidend, weil deren Kühlung gleichzeitig die Wärmeabfuhr für den Reaktor sicherstellt. Niedrige Entwicklungsgrade könnten zu Effizienzverlusten führen, die die Energiebilanz des Kraftwerks erheblich beeinträchtigen.

Tritium-Erbrütung und -Rückgewinnung validieren		Blankets
<i>Voraussetzungen</i>	<i>Auswirkungen</i>	
Anlagen zur Testung mit fusionspezifischen Neutronen	<ul style="list-style-type: none"> • Grundlage für Entscheidung über Blanket-Design • Tritium-Selbstversorgung für das Kraftwerk ermöglicht 	

Die Erbrütungsfähigkeiten von Blanket-Konzepten sowie deren Tritium-Inhalt und -Rückgewinnung müssen getestet und validiert werden; dazu gehört auch die experimentelle Überprüfung der Vorhersagen zur Tritium-Erbrütung. Darüber hinaus müssen die Permeation und die Aktivität von Tritium innerhalb des Spülgases gemessen werden. Aussagekräftige Tests benötigen Neutronen mit reaktorähnlichem Energiespektrum und Fluss, was die Testinfrastruktur einschränkt. Die zum Testen erforderlichen Neutronenquellen sind derzeit noch nicht verfügbar, die für ITER anvisierten Test-Blanket-Module derzeit noch in Entwicklung.

In der geplanten Neutronenquelle IFMIF-DONES, die das Potenzial für Neutronentests im Medium-Flux-Bereich aufweisen soll, sollen Tests mit Brut-Blankets (in reduzierter Größe) durchgeführt werden können (Rapisarda et al., 2025). Mit der vorgeschlagenen CANSKA-Anlage können die Blankets – auch als komplettes System – auf TRL 6 gebracht werden (Hernández et al., 2026). Weitere Entwicklungen, etwa rund um die Tritium-Rückgewinnung, erfordern reaktorähnliche Bedingungen, die in einem Pilotkraftwerk vorfindbar wären.

Zuverlässigkeit und Sicherheit von Blanket-Modulen nachweisen		Blankets
<i>Voraussetzungen</i>	<i>Auswirkungen</i>	
Testinfrastruktur mit fusionspezifischen Neutronen, auch in Kombination mit anderen Faktoren (beispielsweise Wärmebelastung)	Betriebsparameter und Sicherheitsgrenzen definiert	

Blankets unterliegen hohen thermischen wie nuklearen Belastungen und enthalten große Mengen Tritium, wodurch sie als sicherheitskritische Komponenten gelten. Gleichzeitig erfüllen Blankets in einem Kraftwerk wichtige Funktionen (zum Beispiel die Tritium-Erbrütung), womit eine besondere Zuverlässigkeit vorausgesetzt wird. Um etwaige Risiken zu minimieren, werden thermomechanische, korrosions- und nuklearbedingte Schwachstellen in Teilmodulen und kompletten Blanket-Modulen bewertet.

Fusionspezifische Neutronenquellen mit reaktorähnlichen Flüssen würden diese Tests ermöglichen. Es sind mehrere Anlagen in Planung, etwa die vorgeschlagene SHINE-Quelle am Forschungszentrum Jülich (Hernández et al., 2026) oder die ITER-Test-Blanket-Module.

Lithium-Anreicherung für Blanket-Systeme sicherstellen		Blankets
<i>Voraussetzungen</i>	<i>Auswirkungen</i>	
<ul style="list-style-type: none"> • Quellen für angereichertes Lithium (nationale Anlagen oder internationale Kooperationen) • Rechtsrahmen für angereichertes Lithium 	Versorgung mit kritischem Rohstoff für Blanket-Fertigung	

Die meisten Brut-Konzepte setzen auf angereichertes Lithium-6 – ein Fusionskraftwerk braucht etwa einige Hundert Kilogramm. Die Versorgung mit angereichertem Lithium-6 ist kritisch, da es kaum verfügbar ist und zivile Anreicherungsanlagen fehlen. Daneben könnte die gesellschaftliche Akzeptanz gegenüber dem Bau von Anlagen zur Lithium-Anreicherung, die Quecksilber verwenden, eher gering sein. Bislang sind die bereits in Entwicklung stehenden quecksilberfreien Verfahren noch nicht anwendungsreif.

Strategische Lösungen umfassen die parallele Entwicklung quecksilberfreier Anreicherungsverfahren, die Integration der Lithium-Anreicherung in die Blanket-Fertigung sowie die Schaffung regulatorischer Rahmenbedingungen, die eine sichere Handhabung, Transport und gesellschaftliche Akzeptanz gewährleisten.

Rechtsrahmen für Lithium-Anreicherung und Handhabung schaffen	Blankets
<i>Voraussetzungen</i>	<i>Auswirkungen</i> <ul style="list-style-type: none"> • Sichere Handhabung eines kritischen Rohstoffs mit potenziellen Proliferationsimplikationen • Klärung der Nutzung von Quecksilber

Um die Versorgung mit und Nutzung von Lithium-6 zu sichern, sind weitere Vorschriften und vereinbarte Normen notwendig, die das zulässige Anreicherungs-niveau (zur Vermeidung von Proliferationsrisiken) sowie Handhabung und Transport von Lithium-6 definieren.

Da die derzeit verfügbaren Verfahren zur Lithium-Anreicherung Quecksilber verwenden, sind internationale Abkommen wie das Minamata-Abkommen zu berücksichtigen. Lösungsvorschläge umfassen Regierungsinterventionen, Ausnahmeregelungen und die Festlegung verbindlicher Normen.

Tritium-Versorgung und Brennstoffkreislauf

Tritium ist radioaktiv, diffundiert leicht und wirkt biotoxisch: Der Umgang damit erfordert höchste Sicherheit und präzise Kontrolle – ein geschlossener Brennstoffkreislauf ist daher unverzichtbar. Sowohl bei der Magnet- als auch bei der Trägheitsfusion ist noch viel Forschungsarbeit zu leisten, vor allem im Hinblick auf Design, Effizienz und Sicherheit. Ein künftiges Fusionskraftwerk muss Tritium im Reaktor erzeugen, chemisch aufbereiten, aus dem Reaktionsabgas abtrennen und wiederverwenden. Diese technisch anspruchsvollen und energieintensiven Schritte bestimmen die Gesamtbilanz des Kraftwerks. Eine nachhaltige, sichere und energieeffiziente Tritium-Wirtschaft ist damit der Schlüssel zur Fusion als Energiequelle.

Sicherstellung der Tritium-Verfügbarkeit	Tritium-Versorgung und Brennstoffkreislauf
<i>Voraussetzungen</i>	<i>Auswirkungen</i> Sicherung des Startinventars für Fusionskraftwerke

Ein Kraftwerk braucht schätzungsweise 3 bis 5 Kilogramm Tritium als Startinventar. Die Versorgungsketten sind kaum entwickelt, da Tritium bisher keinen zivilen Nutzen erfüllte. Deutschland hängt dabei stark von ausländischen Quellen ab. Darüber hinaus erlauben bestehende Transportprotokolle lediglich den Transfer weniger Gramm zwischen Einrichtungen – das liegt weit unter den Mengen, die die Fusionsindustrie benötigt.

Kanada ist derzeit der einzige Lieferant, der Tritium aus CANDU-Reaktoren bereitstellt. Weitere künftige Anlagen in Rumänien, Kanada und Südkorea könnten zusätzliche Quellen erschließen. Auch Spaltungsreaktoren könnten durch lithiumbasierte Erbrütungsprozesse erhebliche Mengen Tritium für den Start eines Fusionskraftwerks liefern.

Ein verlässliches System zur Tritium-Inventarisierung etablieren	Tritium-Versorgung und Brennstoffkreislauf
<p><i>Voraussetzungen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Kapazitäten zum Testen von Tritium-Absorption in Neutronentestanlagen einreichen • Testanlagen mit fusionspezifischen Neutronen 	<p><i>Auswirkungen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Inventarisierung, Verfolgung von und sicherer Umgang mit Tritium • Datenbasis für Regulatorik über Umgang mit Tritium

Die Inventarisierung und Verfolgung von Tritium (auch „Tritium Accountancy“ genannt) erfordert ein präzises Verständnis seiner Produktion, Gewinnung, Verluste und Freisetzung. Vor allem die Permeation in Materialien führt zu Verlusten, besonders an der ersten Wand, wo Neutronenstrahlung Defekte schafft, in die Tritium eindringt. Die vorhandenen Regularien und Testeinrichtungen für Permeation reichen nicht aus, und die Kalibrierung der Geräte muss speziell auf Tritium abgestimmt sein. Auch die gesellschaftliche Akzeptanz spielt eine Rolle: In der Vergangenheit löste das Risiko austretenden Tritiums erheblichen Widerstand gegen Forschungseinrichtungen aus (Crease, 2024).

Gesetzliche Grenzwerte regeln die Freisetzung von Tritium. Erkenntnisse zur Produktion und Gewinnung stammen aus der Qualifizierung von Blankets. Lösungen für die Tritium-Inventarisierung hängen von der Analyse seiner Speicherung in beschädigten Materialien ab. Dazu gehören Tests in Neutronentestanlagen, die Bestrahlung von Materialien – gegebenenfalls auch mit anderen Spektren, etwa in Kernspaltungsreaktoren – sowie die Untersuchung der Tritium-Permeation in beschädigten Proben.

Brennstoffkreislaufttechnologien entwickeln und integrieren	Tritium-Versorgung und Brennstoffkreislauf
<p><i>Voraussetzungen</i></p> <p>Testanlagen für Brennstoffkreislauf mit und ohne Tritium</p>	<p><i>Auswirkungen</i></p> <p>Wesentlichen Baustein für den Kraftwerksbetrieb gesichert</p>

Viele Technologien zur Tritium-Handhabung und zur Trennung von Wasserstoffisotopen stehen bereit und lassen sich integrieren. Zu diesen Technologien zählen Tritium-Pumpen, Permeationsbarrieren und Systeme zur sicheren Tritium-Lagerung. Die am KIT vorgeschlagene Forschungsanlage DIPAK bietet eine Testumgebung für den gesamten Brennstoffkreislauf. Dort können Komponenten im Maßstab 1:1 erprobt werden.

Gesamten Brennstoffkreislauf qualifizieren	Tritium-Versorgung und Brennstoffkreislauf
<p><i>Voraussetzungen</i></p>	<p><i>Auswirkungen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Qualifizierung des Brennstoffkreislaufs als integriertes System • TBR-Charakterisierung für das gesamte Kraftwerk

Der Brennstoffkreislauf ist bislang nicht standardisiert, da jedes Reaktorkonzept trotz ähnlicher Funktionen eigene Lösungen verfolgt. Zudem fehlt bisher eine durchgängige Zyklusschleife, die für den Dauerbetrieb unerlässlich ist.

Die Gesamtqualifizierung lässt sich in gestaffelten Schritten umsetzen: zunächst durch Modellbeispiele wie beispielsweise im Förderprojekt SyrVBreTT (geschätzter Zeitrahmen: 2027), dann durch den Routinebetrieb des ersten integrierten Brennstoffkreislaufs, etwa in der Anlage UNITY-2 in Kanada (geschätzter Zeitrahmen: 2028), und schließlich durch den Betrieb mit Tritium, beispielsweise in der H3AT-Anlage in Großbritannien (geschätzter Zeitrahmen: 2032). Zwischen den mittleren und finalen Schritten bleibt Raum für Testanlagen in Deutschland, die die Systeme unter realistischen Bedingungen validieren können. Die integrierte TBR-Charakterisierung wird ein Pilotkraftwerk erfordern, um die Zeitpläne der Fusionsunternehmen und des Aktionsplans einzuhalten.

3.4 Kraftwerkstechnologien

Wartung

Ein Wartungskonzept sorgt für den reibungslosen Betrieb und die kontinuierliche Optimierung eines Fusionskraftwerks. Die Bedingungen im Kraftwerk stellen besondere Herausforderungen an die Wartungsarbeiten: Hohe Temperaturen und Radioaktivität erfordern ferngesteuerte Verfahren und den Einsatz von Robotern, die noch zu entwickeln sind. Darüber hinaus beeinflusst die Häufigkeit des Austauschs von Komponenten die Wirtschaftlichkeit des Kraftwerks erheblich. Die angestrebte Verfügbarkeit soll mit der von Spaltungskraftwerken vergleichbar sein.

Umfassendes Wartungskonzept frühzeitig mitdenken	Wartung
<i>Voraussetzungen</i>	<i>Auswirkungen</i> <ul style="list-style-type: none"> • Wartung als ganzheitliches System konzipiert • Bessere Integration ins Kraftwerkssystem

Die Wartung eines Fusionskraftwerks bringt besondere Herausforderungen mit sich, vor allem beim Austausch der Blankets und von In-vessel-Komponenten. Für die Integration von Blankets in Stellaratoren sind spezifische Lösungen erforderlich, um sie in die kompakte und verdrehte Struktur von Stellaratoren einzupassen.

Eine weitere Komplikation ist außerdem, dass die meisten verfügbaren Diagnosegeräte an der hohen Strahlung im Reaktor scheitern. Im militärischen Bereich kommt strahlungs- und neutronengehärtete Elektronik zum Einsatz, doch diese ist extrem kostspielig. Auch die Größe des Reaktors beeinflusst die Wartung: kompakte Bauweisen, die Komponenten stärker beanspruchen und den Wartungszugang erschweren.

Der einfache Austausch von Teilen und Anschlüssen, etwa durch Robotik und modulare Komponenten, sollte ein zentrales Designkriterium sein. Zwischen den verschiedenen Fusionskonzepten gibt es Synergien: So ähnelt das Entfernen der Blanket-Module im Tokamak dem Vorgehen beim Stellarator. Auch bei Schweißtechniken, der Installation schwerer Lasten und der Tritium-Handhabung zeigen sich Parallelen

zwischen unterschiedlichen Ansätzen. Diese Gemeinsamkeiten ermöglichen die Entwicklung gemeinsamer Lösungen.

Leistungsfähige Wartungsroboter entwickeln	Wartung
<i>Voraussetzungen</i>	<i>Auswirkungen</i> Fernwartung von Fusionsreaktoren wird möglich

Noch ungeklärte Details der Reaktorkonzepte und komplexe Geometrien erschweren die Entwicklung von Wartungsrobotern und die Anpassung existierender Lösungen. Wartungsroboter müssen hohe Anforderungen an Belastbarkeit, Reichweite und Präzision erfüllen – etwa tonnenschwere Lasten über mehrere Meter mit einer Präzision von weniger als einem Millimeter bewegen können. Eine solche Technologie existiert bislang nicht.

Die Industrie sollte frühzeitig bei Entwicklungen zum Reaktorkonzept eingebunden werden.

Systemintegration

Das Zusammenspiel der fertig entwickelten und integrierten Komponenten in einem Gesamtsystem, die Systemintegration, ist für einen stabilen und sicheren Betrieb eines Fusionskraftwerks essenziell. Hiervon zu unterscheiden und nicht im Fokus der vorliegenden Betrachtung ist die Einbettung von Fusionskraftwerken in das Energiesystem (Kraftwerksintegration).

Gesamtanlagenmodell validieren und Systemtests durchführen	Systemintegration
<i>Voraussetzungen</i> <ul style="list-style-type: none"> • Testanlagen für Komponenten und Teilsysteme • Frühe Einbeziehung von Simulationen in Design-Prozess 	<i>Auswirkungen</i> Kraftwerk als Gesamtsystem kann betrieben werden

Systemtests sind vor dem Bau des Fusionskraftwerks zur Risikominimierung erforderlich. Bisher gibt es noch kein validiertes Gesamtanlagenmodell, und Teilsysteme werden unabhängig voneinander entwickelt. Für die Systemintegration ist es entscheidend, ein Gesamtanlagenmodell zu erstellen und umfassende Systemtests durchzuführen – das kann mit Testanlagen erreicht werden. Danach bedarf es Versuchsreaktoren, die alle Komponenten als Gesamtsystem in kraftwerksrelevanten Bedingungen zusammenbringen. Der Reaktor und das gesamte Kraftwerk müssen gemeinsam weiterentwickelt werden, um die sogenannte Balance-of-Plant und die Verfügbarkeit des Kraftwerks zu gewährleisten.

Die Bereitstellung eines „Concept of Operations“ (Betriebskonzept, ConOps) zur Planung eines Fusionskraftwerkes unterstützt die integrierte Betrachtung aller Teilsysteme. Das Betriebskonzept legt quantitative und qualitative Eigenschaften des Systems fest, einschließlich der Ziele, Strategien, Richtlinien und Prozesse für Entwicklung, Betrieb, Wartung sowie Stilllegung des Kraftwerks (IEEE, 1998). Versuchsreaktoren, wie beispielsweise der japanische FAST (FAST Project, 2024), bieten eine Vorstufe zu kraftwerkstauglichen Anlagen und ermöglichen integrierte Tests. Dabei können einzelne Faktoren wie Wärme, Strahlung oder Magnetfelder untersucht werden, nicht jedoch deren kombinierte Wirkung. Die in Deutschland umfassend vorliegenden Fachkenntnisse über die Integration von Großsystemen aus der

Hochenergiephysik und der Fusionsforschung (zum Beispiel ITER, ASDEX-Upgrade, W7-X) lassen sich für Aspekte der Systemintegration verwerthen.

Integrierte Systemmodellierung und digitale Zwillinge einsetzen	Systemintegration
<p><i>Voraussetzungen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Integrierte Code-Bibliothek (wie beispielsweise am KIT in Entwicklung) • 	<p><i>Auswirkungen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Eine koordinierte Entwicklung von Simulationscode ermöglicht die Beschleunigung und Vereinheitlichung der verfügbaren Codes. • Betriebsplanung für das gesamte Kraftwerk • Frühzeitige Prozessoptimierung

Für die Systemintegration (Systems Engineering) ist eine integrierte Modellierung für die Systemplanung, die Integration sowie das Projektmanagement notwendig; hierfür können Simulationen, KI-Werkzeuge und digitale Zwillinge genutzt werden. Die für die Simulationen des brennenden Plasmas und des gesamten Kraftwerksbetriebs zugrunde liegenden Codes müssen kontinuierlich entwickelt und validiert werden. Die Validierung von Automatisierungscodes für Spaltungsreaktoren kann hierfür als Beispiel herangezogen werden.

Standort für Kraftwerk festlegen	Systemintegration
<p><i>Voraussetzungen</i></p>	<p><i>Auswirkungen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Kraftwerksbau möglich • Erleichterte soziale Akzeptanz bei frühzeitiger Standortauswahl

Bei der Entscheidung zur Standortwahl muss zwischen Greenfield- und Brownfield-Optionen abgewogen werden, um sowohl technische als auch gesellschaftliche Anforderungen zu erfüllen.

Die Standortwahl für ein Fusionskraftwerk ist strategisch entscheidend. Der Vorteil von Brownfield-Ansätzen, die auf bestehenden Spaltungs- oder Kohlekraftwerksstandorten basieren, liegt in der bereits vorhandenen Netzinfrastruktur und Wasserversorgung, wodurch keine zusätzlichen Qualifikationen oder Lizenzen benötigt werden. Gleichzeitig ist die soziale Akzeptanz in der Gesellschaft bei diesem Prozess entscheidend. Um eine solche Akzeptanz zu fördern, sollten der Standort frühzeitig ausgewählt, die Bevölkerung einbezogen und Risiken dabei nicht verharmlost oder gar verschwiegen werden.

4. Entwicklungspfade und Handlungsoptionen zu einem Fusionskraftwerk

In den vorangegangenen Kapiteln wurden **der aktuelle Stand** von Forschung und Technologie zusammengeführt, **internationale Roadmaps** und strategische Programme analysiert und die zentralen technologischen **Herausforderungen sowie die Zwischenziele** identifiziert, die für die Erreichung des Gesamtziels erforderlich sind. Die Roadmap selbst verfolgt das Ziel, mögliche **Wege zu einem ersten deutschen Fusionskraftwerk** darzustellen und eine belastbare Faktenbasis zu schaffen, die physikalische, technische und organisatorische Anforderungen systematisch einordnet. Sie versteht sich dabei nicht als

technische Detailvorgabe, sondern als Darstellung und Analyse möglicher Handlungsoptionen und -szenarien.

Die Roadmap ist **nicht als Top-down-Ansatz** angelegt und hat nicht das Ziel, einzelnen Akteuren verbindliche Handlungsschritte vorzuschreiben. Vielmehr werden Handlungsoptionen analysiert und mögliche Pfade transparent dargestellt.

Die im ersten Teil erarbeitete Faktenbasis bildet die Grundlage für die in diesem Kapitel aufbereiteten **Handlungsoptionen und Entwicklungspfade**. Damit wird die Basis geschaffen, **nachvollziehbare politische Entscheidungen** bezüglich einer möglichen Priorisierung bei der Ausgabe von öffentlichen Mitteln zu treffen, da Ressourcen begrenzt sind und Entscheidungen auf einer klaren Wissensgrundlage erfolgen sollten. Die Einschätzungen der möglichen **Risiken** und **Geschwindigkeiten bei der Umsetzung** hängen von den verfügbaren **Ressourcen** ab.

Im Einklang mit den entstehenden Fusions-Hubs (BMFTR, 2025b) richtet sich diese Roadmap an den drei **technologischen Pfaden Magnetfusion, Laserfusion** sowie **Materialien und Brennstoff** aus. Ergänzend hierzu stehen Maßnahmen zur Integration der Einzelkomponenten in ein Gesamtsystem und der **Aufbau eines deutschen Fusionsökosystems** im Fokus, um den Technologietransfer und die praktische Umsetzung der Innovationen zu ermöglichen.

Auf Basis von Projektgruppensitzungen, Workshops, Experteninterviews und einer Literaturlauswertung wurden **entlang dieser Pfade Handlungsoptionen** entwickelt, die Zwischenziele auf dem Weg zum Bau eines Fusionskraftwerks verdeutlichen. Wo möglich wurden **zeitliche Dimensionen** einzelner Entwicklungsschritte abgeschätzt. Die technologischen Herausforderungen zeigen, dass das erste deutsche Fusionskraftwerk einen **langfristigen Entwicklungsprozess** erfordert, gegliedert in zahlreiche voneinander abhängige Zwischenziele. Vor diesem Hintergrund wird beleuchtet, an welchen Stellen **Parallelisierungen** möglich sind und wo ein **sequenzielles Vorgehen** erforderlich bleibt. Ebenso wird aufgezeigt, in welchen Bereichen **internationale Kooperationen** notwendig sind. Darüber hinaus werden die skizzierten Handlungsoptionen entlang der zentralen Entscheidungsdimensionen **Geschwindigkeit, Ressourceneinsatz und Risiken** überblicksartig analysiert.

Aus den **plausibilisierten Zeitspannen** der einzelnen Entwicklungsschritte wird eine zeitliche Abschätzung abgeleitet, die dem Ansatz folgt, vom Kraftwerk rückwärts zu denken. Auf dieser Basis wird beschrieben, welche Zwischenziele erreicht werden müssten, um bis zur Mitte des Jahrhunderts in Deutschland ein erstes Fusionskraftwerk realisieren zu können. Konkret wird dabei auch die Frage adressiert, was umgesetzt werden müsste, um **bis 2045 ein erstes Fusionskraftwerk** zu errichten.

Mit den Handlungsoptionen wird **politischen Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträgern** eine wissenschaftlich begründete, strategische **Orientierung** angeboten, ohne politische Entscheidungen vorwegzunehmen.

4.1. Magnetfusion

Die Magnetfusion umfasst die beiden zentralen Konzepte Tokamak und Stellarator. Dabei werden Transferpotenziale zwischen den Ansätzen bewertet und plausible Entwicklungspfade skizziert. Der Tokamak liefert wichtige wissenschaftliche und technologische Erkenntnisse, die in Teilen auf andere Ansätze übertragbar sind. Der Stellarator wird mit Blick auf mögliche Zwischenschritte wie Forschungsstellaratoren oder Technologiedemonstratoren sowie auf die Frage der Magnettechnologie mit Hoch- und

Niedrigtemperatursupraleitern betrachtet. Internationale Kooperationen und bestehende Großprojekte werden berücksichtigt. Tabelle 2 fasst die Handlungsoptionen bezüglich der beiden Konzepte und für Supraleiter zusammen.

Option	Vor- und Nachteile	Ermöglicht	
Tokamak			
Bau eines Tokamak-Kraftwerks	Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> • Am meisten entwickelte und erprobte Reaktortechnologie • Einfachere Kraftwerkswartung als Stellarator • Serienfertigung von Komponenten besser möglich Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> • Internationale Akteure haben deutlichen Vorsprung • Weicht von den Pfaden der deutschen Fusionsunternehmen ab: Abhängigkeit von internationalen Kooperationen • Gepulster Betrieb ist weniger geeignet für Kraftwerk 	Kraftwerk	
Fortgesetzte Beteiligung an Tokamak-Kooperationen	Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> • Mehrere Zwischenziele entlang des Stellarator-Entwicklungspfades werden beschleunigt, insbesondere bezüglich Plasmabedingungen und Materialien Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> • Verzicht auf die fortgeschrittenste Technologie als Basis für das deutsche Kraftwerk 	Beschleunigt Wartung, Materialien, Brennstoffkreislauf und Plasmaeinschluss für Stellarator	
Stellarator			
Alternativ zueinander	Bau eines Forschungsstellarators als Zwischenschritt zum Kraftwerk	Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> • Fragen der Plasmaphysik (zum Beispiel Plasmaeinschluss-Skalierung) und der Technologie (Divertor, Qualifizierung von Wolfram) im Voraus geklärt Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> • Fusionsunternehmen bauen Know-how nur bei Einbeziehung auf • Lange Zeitskala, bis Erkenntnisse vorliegen 	Plasmaeinschluss, Divertor, Validierung von Materialien (insbesondere Wolfram)
	Bau eines	Vorteile:	Supraleitermagnete,

Technologiedemonstrators als Zwischenschritt zum Kraftwerk	<ul style="list-style-type: none"> • Fragen der Plasmaphysik (zum Beispiel Plasmaeinschluss-Skalierung) und der Technologie (Divertor, Qualifizierung von Wolfram) im Voraus geklärt • Schnellere Umsetzung als beim Forschungsstellarator • Schnellster Zwischenschritt zum Kraftwerk Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> • Aufbau von Know-how auf wenige Akteure beschränkt • Nachnutzung für Forschung erfordert gegebenenfalls Umrüstungen 	Plasmaeinschluss, Divertor, Validierung von Materialien (insbesondere Wolfram)
Direkte Entwicklung des Kraftwerks	Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> • Frühe Festlegung eines Reaktordesigns mit hoher Systemintegration • Gezielte Entwicklung und Qualifizierung der Schlüsseltechnologien • Einbindung der Industrie zu Entwicklung, Skalierung und Lieferkettenaufbau Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> • Frühes „Design Freeze“ • Hohes technologisches Risiko (insbesondere bei Divertor und Tritium-Erbrütung) wegen ungetesteter Konzepte 	Kraftwerk
Supraleiter		
Entwicklungsprogramm HTS für Stellaratoren	Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> • Entscheidung über Magnettechnologie (HTS oder LTS) zur Weiterentwicklung des Stellarators • Großes Spillover-Potenzial Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> • Industrie ist derzeit begrenzt lieferfähig • Erhöhte Zeit- und Planungsunsicherheit bei paralleler Technologie- und Anlagenentwicklung 	Supraleitermagnete

Tabelle 2: Zusammenfassung der Handlungsoptionen für die Konzepte Tokamak, Stellarator und Supraleiter.

Tokamak

Stand heute gilt der **Tokamak** als am weitesten entwickelte Technologie unter allen Fusionsansätzen. Allerdings weist er, wie in Kapitel 3.1 erläutert, als Technologie für ein Kraftwerk einige bedeutende Schwächen auf. International wurde in den vergangenen Jahren massiv in die Entwicklung von Tokamak-Kraftwerken investiert. Die Inbetriebnahme neuer Tokamak-Anlagen (beispielsweise SPARC und BEST) wird die Rolle Deutschlands beim Tokamak schwächen. Die möglichen Entwicklungspfade, die den Tokamak beinhalten, bieten Deutschland dadurch zwei grundlegende Alternativen: massive Investitionen oder eine nachrangige Behandlung dieser Technologie.

Option: Bau eines Tokamak-Kraftwerks

Kosten: (Datenabfrage ist erfolgt, Bearbeitung wird fortgeführt)

Zeitskala: (Datenabfrage ist erfolgt, Bearbeitung wird fortgeführt)

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Am meisten entwickelte und erprobte Reaktortechnologie • Einfachere Kraftwerkswartung als Stellarator • Serienfertigung von Komponenten besser möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Internationale Akteure haben deutlichen Vorsprung • Weicht von den Pfaden der deutschen Fusionsunternehmen ab: Abhängigkeit von internationalen Kooperationen • Gepulster Betrieb ist weniger geeignet für Kraftwerk

Deutschland muss aufholen, um das weltweit erste Tokamak-Kraftwerk zu bauen. Internationale Akteure wie China, das Vereinigte Königreich und Commonwealth Fusion Systems haben bei der Entwicklung von Tokamaks einen klaren Vorsprung. Zwar verfügen deutsche Forschungseinrichtungen über Expertise in diesem Bereich, doch stützt sich die Infrastruktur auf ASDEX-Upgrade, der technisch nicht auf dem neuesten Stand ist und bald von moderneren Geräten übertroffen wird. Zudem richten deutsche Fusionsunternehmen, die an Magnetfusion arbeiten, ihren Schwerpunkt auf den Stellarator. Ein nationaler Kurswechsel hin zum Tokamak wäre daher eine ambitionierte Aufgabe.

Hinsichtlich Geschwindigkeit, erforderlicher Ressourcen und Risiken lässt sich die Errichtung eines Tokamak-Kraftwerks wie folgt zusammenfassen:

Geschwindigkeit: Ohne Vorreiterexperimente oder eine bereits aktive industrielle Basis würde die Entwicklung eines Tokamak-Kraftwerks in Deutschland länger dauern als bei den führenden Ländern auf diesem Gebiet, insbesondere China.

Ressourcen: Die Entwicklung eines Tokamak-Kraftwerks erfordert einen massiven Ausbau der Forschungsstrukturen und der Zulieferindustrie. Dafür sind hohe Investitionen notwendig.

Risiko: Selbst umfangreiche Investitionen wären möglicherweise unzureichend, um den Rückstand gegenüber den fortschrittlichsten internationalen Wettbewerbern aufzuholen. So birgt die Errichtung eines Tokamak-Kraftwerks in Deutschland das sehr hohe Risiko, bei der Entwicklung hin zu einem Kraftwerk nicht schneller als die Konkurrenz zu sein.

Option: Fortgesetzte Beteiligung an Tokamak-Kooperationen

Kosten: In der aktuellen Förderung der beteiligten Einrichtungen enthalten

Zeitskala: ITER-Zeitplan: Inbetriebnahme 2034; brennendes Plasma 2040

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> Mehrere Zwischenziele entlang des Stellarator-Entwicklungspfades werden beschleunigt, insbesondere bezüglich Plasmabedingungen und Materialien 	<ul style="list-style-type: none"> Verzicht auf die fortgeschrittenste Technologie als Basis für das deutsche Kraftwerk

Deutschland kann an der Entwicklung des **Tokamaks durch Kooperationen mitwirken**, beispielsweise im Rahmen von ITER, SPARC und BEST. Eine fortgesetzte Beteiligung an ITER würde Zugang zu wichtigen Erkenntnissen aus dem – derzeit noch im Bau befindlichen – weltgrößten Tokamak-Reaktor bieten. Die bestehende **ITER-Kooperation** eröffnet auch die Möglichkeit, bereits vorhandene Expertise effizient zu nutzen sowie Fachkräfte auszubauen. Erkenntnisse aus ITER tragen zur Weiterentwicklung des Stellarators bei; so lassen sich insbesondere das Wissen und die Erfahrungen rund um das Plasma und die Einwirkungen auf die Materialien auf den Stellarator übertragen. Daneben lässt sich die Expertise zu **Strahlensicherheit, Entsorgung** und **Umgang mit Tritium** grundsätzlich auch auf den Stellarator sowie die Laserfusion transferieren. Eine Fortsetzung der Beteiligung an ITER ermöglicht die Einbindung der deutschen Industrie über entsprechende Aufträge, wodurch Erfahrungen zur Fertigung von Komponenten eines Fusionskraftwerks gesammelt werden können.

*Hinsichtlich Geschwindigkeit, erforderlicher Ressourcen und Risiken lässt sich **eine Fortsetzung der deutschen Beteiligung an internationalen Tokamak-Kooperationen** wie folgt zusammenfassen:*

Geschwindigkeit: Die Beteiligung an internationalen Tokamak-Kooperationen führt per se nicht zur schnellen Realisierung eines deutschen Kraftwerks. Einige Entwicklungen und Erkenntnisse aus dem Tokamak lassen sich allerdings gut **auf den Stellarator übertragen**. Dies umfasst die Plasmaphysik, insbesondere rund um das brennende Plasma, sowie Technologien wie beispielsweise Diagnostik, Brennstoffkreislauf, Wartung und Materialien. Damit würde der Weg zu einem deutschen Stellarator-Kraftwerk beschleunigt.

Ressourcen: Deutsche Forschungseinrichtungen sind bereits Teil internationaler Tokamak-Kooperationen, insbesondere ITER. Die Fortsetzung dieser Beteiligung verursacht keine zusätzlichen Kosten neben den bereits für laufende Programme bereitgestellten Mitteln.

Risiko: Die Beteiligung an großen internationalen Forschungsk Kooperationen birgt nur sehr geringe Risiken, die mit anderen Ländern geteilt werden. Vielmehr fördert sie die Lösung grundlegender wissenschaftlicher Fragen und verringert so das Risiko nationaler Technologieinitiativen, auch im Bereich des Stellarators.

Stellarator

Der Stellarator erscheint langfristig besser geeignet für ein Magnetfusionskraftwerk, wengleich der Tokamak nach heutigem Stand der Technik weiter fortgeschritten ist. Einerseits sind Stellaratoren verlässlicher im Betrieb, weil sie das Problem der Plasmadisruptionen umgehen, andererseits werden Stellaratoren nicht mit gepulstem Strom betrieben und lassen sich damit besser in einem kontinuierlichen Betrieb umsetzen. Letzteres erleichtert auch die Integration in das Energiesystem verglichen mit einem gepulsten Betrieb, wie er bei den meisten Tokamaks erforderlich ist.

Zwischen dem fortgeschrittensten verfügbaren Stellarator (Wendelstein 7-X) und einem kraftwerkstauglichen Stellarator stehen noch einige ungeklärte Fragen. Denn die Plasmabedingungen in dem bestehenden Wendelstein 7-X-Stellarator lassen sich nicht auf einer kraftwerksrelevanten Skala extrapolieren. Für wichtige Komponenten sind weitere Entwicklungs- und Validierungsschritte vor dem Einsatz in einem Kraftwerk erforderlich.

Diese Entwicklung könnte grundsätzlich über zwei unterschiedliche Pfade erfolgen: Ein Pfad nutzt einen Forschungsstellarator oder Technologiedemonstrator als Zwischenschritt, um wissenschaftliche Fragen zu klären und neue Konzepte zu testen. Zum Beispiel können in einem passenden Zwischenschritt-Stellarator **unterschiedliche Divertor-Konzepte** erprobt werden. Zudem würde der Zwischenschritt-Stellarator die angemessenen Belastungen anbieten, um **Wolfram als Material für die erste Wand** für den Kraftwerkeinsatz vollständig zu qualifizieren.

Der andere Pfad zielt direkt auf die Entwicklung eines Fusionskraftwerks ohne Zwischenschritte ab. Die notwendigen physikalischen Erkenntnisse werden dabei in kurzen Zyklen aus veröffentlichten Forschungsergebnissen gewonnen. Qualifizierung von Komponenten und Validierung der Physik erfolgen im Laufe der Kraftwerkentwicklung.

Beide Pfade lassen sich mit LTS- oder HTS-Magneten umsetzen. Deren Wahl beeinflusst auch die Zeit- und Risikoprofile. So sind LTS-Magnete näher an der Anwendung, laufen jedoch Gefahr, innerhalb kurzer Zeit technologisch überholt zu werden, während HTS-Magnete weitere Entwicklungen erfordern, aber langfristig vielversprechender sind. Die Zeitskala bis zum Kraftwerk hängt dabei in allen Fällen kritisch von den Entwicklungen entlang des Entwicklungspfads für Materialien und Brennstoff ab.

Die folgenden Optionen stellen drei mögliche Umsetzungsszenarien dar: ein Zwischenschritt-Stellarator zur reinen Forschung, ein Zwischenschritt-Stellarator als Demonstrator der kraftwerksrelevanten Technologien und die direkte Entwicklung eines Stellarator-Kraftwerks. So schließen sich diese Optionen gegenseitig aus.

Option: Bau eines Forschungsstellarators als Zwischenschritt zum Kraftwerk

Kosten:

2 bis 3 Milliarden Euro

Zeitskala:

- 10 Jahre ab Baubeginn
- Schlüsselergebnisse (Plasmabedingungen, Divertor, 1. Wand) innerhalb der darauffolgenden 10 Jahre

Vorteile

- Fragen der Plasmaphysik (zum Beispiel Plasmaeinschluss-Skalierung) und der Technologie (Divertor, Qualifizierung von Wolfram) im Voraus

Nachteile

- Lange Zeitskala, bis Erkenntnisse vorliegen

gründlich geklärt

- Möglichkeit für breiten Aufbau von Know-how (wenn Fusionsunternehmen einbezogen)

Als Forschungsgrößgerät gilt ein solcher Forschungsstellarator als **vorwettbewerbliche Infrastruktur**, die alle Akteure mit wichtigen Erkenntnissen aus der Grundlagenforschung versorgt. Außerdem dient er als **Prüfstand für mehrere Technologien und ihre Integrationen**, beispielsweise Supraleitermagnete, Divertor und erste Wand. Dadurch generiert er Expertise und Know-how für sämtliche beteiligten Akteure. Zur Wahrung gleicher Wettbewerbsbedingungen soll der Zugang zur Infrastruktur weitestmöglich für alle Akteure offengelassen werden – sowohl hinsichtlich der Nutzung der Anlage als auch für ihren Entwurf.

Deutschland steht eine breite Expertise über **Bau und Betrieb von Stellaratoren für die Grundlagenforschung** zur Verfügung, ebenso wie umfassende Kompetenzen für die Verwertung der Ergebnisse. Hier sind sowohl **Forschungseinrichtungen** wie das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und das KIT als auch die **Fusionsunternehmen** Proxima Fusion und p Fusion relevant. Die Einbindung der Fusionsunternehmen könnte also dazu beitragen, einen Forschungsstellarator **perspektivisch in einen Kraftwerksreaktor umzusetzen** und die dafür notwendige Systemintegration im Blick zu halten. Dazu kann die **Beteiligung von Kraftwerksbauern** und der Zulieferindustrie an dem Vorhaben weitere wichtige Beiträge leisten.

*Hinsichtlich Geschwindigkeit, erforderlicher Ressourcen und Risiken lässt sich die **Errichtung eines Forschungsstellarators** wie folgt zusammenfassen:*

Geschwindigkeit: Erst nach Inbetriebnahme des Forschungsstellarators und entsprechenden Experimentalkampagnen können Entscheidungen (beispielsweise zum Divertor) getroffen und Komponenten qualifiziert werden. Da mit dem Bau des Kraftwerks erst danach begonnen werden kann, ist der Weg durch einen Forschungsstellarator zeitaufwendig.

Ressourcen: In dieser Option werden zwei Stellaratoren gebaut. Bei dem ersten handelt es sich außerdem um ein reines Forschungsgerät. Daher ist mit wesentlichen Beteiligungen aus Privatkapital nicht zu rechnen.

Risiko: Der Forschungsstellarator klärt umfangreich wissenschaftliche Fragen ab und erprobt Technologien. So werden Risiken insgesamt sowie die Unsicherheit hinsichtlich Zeit und Kosten für das Kraftwerk reduziert.

Option: Bau eines Technologiedemonstrators als Zwischenschritt zum Kraftwerk

Kosten:

Ca. 2 bis 4 Milliarden Euro

Zeitskala:

- Aufbau: 8 Jahre
- Schlüsselergebnisse (Plasmabedingungen, Divertor, 1. Wand) innerhalb der darauffolgenden 10 Jahre

Vorteile

Nachteile

- Fragen der Plasmaphysik (zum Beispiel Plasmaeinschluss-Skalierung) und der Technologie
- Aufbau von Know-how auf wenige Akteure beschränkt

- (Divertor, Qualifizierung von Wolfram) im Voraus geklärt
- Schnellere Umsetzung als beim Forschungsstellarator
 - Schnellster Zwischenschritt zum Kraftwerk
- Nachnutzung für Forschung erfordert gegebenenfalls Umrüstungen

Unter Technologiedemonstrator ist ein Zwischenschritt-Stellarator zu verstehen, der nicht der Grundlagenforschung, sondern der praktischen Erprobung einer konkreten Umsetzung dient. Er teilt Vorteile mit dem Forschungsstellarator, etwa die Reduzierung des technologischen Endrisikos. Forschungsstellarator und Technologiedemonstrator ähneln sich in ihrer Funktion, unterscheiden sich jedoch deutlich in der Steuerung und hinsichtlich der Beteiligten: Forschungseinrichtungen betreiben den Forschungsstellarator als Teil der öffentlichen Infrastruktur, während ein Technologiedemonstrator von einem privaten Unternehmen initiiert und federführend geleitet wird – Kooperationen mit Forschungseinrichtungen in diesem Rahmen sind eine Option.

Ein Technologiedemonstrator erfordert per Definition einen Akteur, etwa ein Fusionsunternehmen, dessen Technologie getestet wird. Das kann den Bau der Anlage im Vergleich zu einem Forschungsstellarator zwar beschleunigen, bringt aber Ungleichgewichte ins Ökosystem – denn ein Technologiedemonstrator ist keine vorwettbewerbliche Infrastruktur: Das im Projekt gewonnene Know-how über den Bau von Stellaratoren bliebe beispielsweise jenen vorbehalten, die den Demonstrator umsetzen.

Ein funktionsfähiger Stellarator als Technologiedemonstrator könnte nach Abschluss seiner Demonstrationsphase auch als Forschungsinstrument dienen. Daher ließe er sich der wissenschaftlichen Gemeinschaft nach der Demonstration bereitstellen. Diese Nachnutzung ließe sich schon bei der Planung miteinbeziehen. Zwar würde das den Bau teurer und zeitaufwendiger machen, doch wäre eine spätere Nachrüstung nicht erforderlich.

Sowohl der Zugang zum Know-how als auch die Möglichkeit der Nachnutzung können den Umfang der öffentlichen Beteiligung am Technologiedemonstrator beeinflussen.

*Hinsichtlich Geschwindigkeit, erforderlicher Ressourcen und Risiken lässt sich **die Errichtung eines Technologiedemonstrators als Stellarator-Zwischenschritt** wie folgt zusammenfassen:*

Geschwindigkeit: Der Technologiedemonstrator muss gebaut werden, um Entscheidungen etwa über den Divertor und die erste Wand zu treffen. Die entsprechenden Tests sowie der Bau des Stellarators werden aber gezielt durchgeführt und nicht in dem Umfang einer kompletten Erforschung. So ist diese Option schneller als der Forschungsstellarator.

Ressourcen: Wie im Fall des Forschungsstellarators werden zwei Stellaratoren gebaut, aber der Technologiedemonstrator bietet die Möglichkeit einer größeren Beteiligung von Privatkapital.

Risiko: Der Zwischenschritt klärt wissenschaftliche Fragen ab und erprobt Technologien. So werden Risiken insgesamt reduziert. Der Technologiedemonstrator basiert auf dem Ansatz eines spezifischen Akteurs und ist daher riskanter als ein Forschungsstellarator.

Option: Direkte Entwicklung des Kraftwerks

Kosten:	Ca. 15 bis 18 Milliarden Euro Gesamtkosten
Zeitskala:	<ul style="list-style-type: none"> • Ca. 8 Jahre bis zum Baustart • Zuzüglich ca. 10 bis 12 Jahre bis Inbetriebnahme

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Frühe Festlegung eines Reaktordesigns mit hoher Systemintegration • Gezielte Entwicklung und Qualifizierung der Schlüsseltechnologien • Einbindung der Industrie zu Entwicklung, Skalierung und Lieferkettenaufbau 	<ul style="list-style-type: none"> • Frühes „Design Freeze“ • Hohes technologisches Risiko (insbesondere bei Divertor und Tritium-Erbrütung) wegen ungetesteter Konzepte

Bei dieser Option wird darauf gesetzt, direkt – ohne Zwischenschritte – ein Fusionskraftwerk zu realisieren. Die Notwendigkeit, Komponenten zu entwickeln und zu qualifizieren, bleibt dabei jedoch bestehen. Die Entwicklung erfolgt vor Baubeginn und wird gezielt an dem spezifischen Reaktordesign ausgerichtet. Komponenten werden also von Anfang an als **Gesamtsystem** konzipiert. Neben einer erhöhten Systemintegration führt dieser Ansatz zu einer schnelleren Entwicklung und einer frühzeitigen Sicherung von **Intellectual Property (IP)** in Schlüsseltechnologien, zum Beispiel im Bereich Magnete, Brut-Blankets und Brennstoffkreislauf. Insbesondere bei Magneten kann die Anwendung von HTS- und LTS-Technologie gezielt erprobt und ihre Umsetzbarkeit für Kraftwerkzwecke rasch abgeschätzt werden.

Direkt auf den Bau eines Kraftwerks zu zielen, beschleunigt die industrielle Hochskalierung der Komponentenfertigung. Durch eine frühzeitige Entscheidung über die erforderlichen Komponenten ist es möglich, **Industriepartner** bereits in den ersten Entwicklungsphasen einzubeziehen. Zu diesem Zweck kann auf ein breites Netzwerk potenzieller Lieferanten in ganz Europa zurückgegriffen werden, um ein koordiniertes Konsortium zu bilden. Damit wird auch ein klares Marktsignal gesetzt, wodurch die notwendigen Lieferketten aktiviert und der Aufbau des Wertschöpfungsökosystems gefördert werden.

Bei dieser Option muss das deutlich erhöhte Risiko akzeptiert werden, dass beispielsweise nicht der für ein Kraftwerk erforderliche Energiegewinn erzielt wird oder Komponenten (insbesondere der Divertor) eine für den Kraftwerksbetrieb unzureichende Lebenszeit aufweisen.

*Hinsichtlich Geschwindigkeit, erforderlicher Ressourcen und Risiken lässt sich **die direkte Entwicklung eines Stellarator-Kraftwerks ohne Zwischenschritt** wie folgt zusammenfassen:*

Geschwindigkeit: Dieses Szenario basiert auf dem Verzicht auf Zwischenschritte und auf schneller und gezielter Entwicklung von Schlüsselkomponenten. Daher führt es schnellstmöglich zum Kraftwerk.

Ressourcen: Die Kosten für Entwicklung und Bau eines Stellarator-Kraftwerks sind sehr hoch (geschätzte 15 bis 18 Milliarden Euro). Die schnelle und parallele Entwicklung sämtlicher Komponenten verursacht zusätzliche Kosten. Allerdings müssen hier nicht zwei Stellaratoren gebaut werden.

Risiko: Durch einen starken Fokus auf die Geschwindigkeit der Entwicklung und die

Integration birgt dieser Ansatz jedoch Risiken. Die größte Gefahr besteht darin, dass Entscheidungen auf der Grundlage unvollständiger Informationen getroffen werden müssen, da keine spezifischen wissenschaftlichen Ergebnisse vorliegen. Ein weiteres Risiko ergibt sich aus dem frühen „Design Freeze“: Wenn mehrere Teilsysteme wesentlich voneinander abhängig sind und stark miteinander integriert entwickelt werden, hat jede Designentscheidung weitreichende Konsequenzen, wodurch Änderungen hohe Kosten verursachen. Bei der angestrebten Zeitskala müssen wesentliche Entscheidungen getroffen werden, bevor belastbare Daten vorliegen. Dadurch besteht das Risiko, dass Verzögerungen oder Probleme bei der Entwicklung eines Teils des Projekts oder einer Komponente den Gesamtfortschritt aufhalten oder auch bei anderen Komponenten schwierige Rückschritte erzwingen.

Supraleiter

Für ein Stellarator-Kraftwerk müssen Magneten gebaut werden, die funktionieren, quenchsicher, produzierbar und wartbar sind (beispielsweise durch ein modulares Design). Darüber hinaus müssen diese Magnete perspektivisch mehrere Jahre unter der vollen **Neutronenbelastung** in einem Kraftwerk arbeiten können. Weder Hoch- noch Niedrigtemperatursupraleiter (HTS beziehungsweise LTS) haben bislang diese Ziele erreicht. Entsprechende Magnete müssen somit noch entwickelt werden beziehungsweise diese Eigenschaften nachweisen.

Die Wahl der Magnettechnologie für die zu bauenden Stellaratoren (sei es für den Zwischenschritt oder für einen Kraftwerksreaktor) hat tiefgreifende Auswirkungen auf das Design des Stellarators und kann nicht rückgängig gemacht werden. Die **bevorzugte Entwicklungsdynamik** bestimmt dabei die zu wählende Magnettechnologie: **LTS-Technologie** ist verfügbar und ermöglicht einen schnelleren Bau. Allerdings laufen LTS-Magnete Gefahr, bereits kurz- oder mittelfristig technologisch von HTS überholt zu werden. **HTS-Technologie** muss andererseits unter Zeit- und Kostenaufwand weiterentwickelt werden. Hierdurch sind signifikante Fortschritte für kraftwerksrelevante Magnettechnologie zu erwarten.

Die deutschen Fusionsunternehmen verfügen bereits über Kompetenzen in der Entwicklung von Supraleitermagneten. Ihre Aktivitäten umfassen die industrielle Fertigbarkeit und Wartbarkeit der Magnete in einem Kraftwerkskontext sowie die Entwicklung und Fertigung von Magneten. Ein kontinuierlicher Austausch mit **ähnlichen Programmen in Frankreich und Großbritannien** würde den Fortschritt beschleunigen. Darüber hinaus trägt eine enge Verzahnung mit dem vom **BMFTR geförderten Projekt HTS4Fusion** (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2025a) zum langfristigen Erfolg der Magnetentwicklung bei.

Option: Entwicklungsprogramm HTS für Stellaratoren

Kosten: 200 bis 400 Millionen Euro

Zeitskala: 4 bis 6 Jahre

Vorteile

- Entscheidung über Magnettechnologie (HTS oder LTS) zur Weiterentwicklung des Stellarators
- Großes Spillover-Potenzial

Nachteile

- Industrie ist derzeit begrenzt lieferfähig
- Erhöhte Zeit- und Planungsunsicherheit bei paralleler Technologie- und Anlagenentwicklung

Ein gezieltes Entwicklungsprogramm für Supraleitermagnete wird den Stand der Magnettechnologie erheblich vorantreiben. Durch das Programm werden Konzepte für **kraftwerksrelevante** und industriell fertigmagbare Magnete erarbeitet. So lassen sich Synergien beim Einsatz der verschiedenen Technologien sowohl in der Forschung als auch im Kraftwerkskontext heben und Kosten, Vorteile und Risiken besser einschätzen. Die Weiterentwicklung von LTS- und HTS-Magneten sowie in diesem Prozess erzielte Fortschritte können die Unsicherheiten bei der Wahl der Technologie für den Bau eines Stellarators verringern.

Wird ein Programm zur Magnetentwicklung mit dem Bau eines Forschungsstellarators kombiniert, würden weitere wichtige **Synergieeffekte** entstehen. Wenn der Bau des Stellarators auch die Entwicklung der Magneten umfasst, wird sowohl Know-how im Bereich der Magnettechnologie als auch zu deren Integration in den Reaktor – und perspektivisch in ein Kraftwerk – generiert.

Entwicklungspfad

Ausgehend von der Beschreibung der Handlungsoptionen und Szenarien ergibt sich ein Entwicklungspfad für ein auf Magnetfusion basierendes Kraftwerk. Dieser Entwicklungspfad fokussiert sich – resultierend aus der vorangegangenen Analyse der Optionen – auf die Stellarator-Technologie. Der Tokamak findet sich dabei in Form der Option zur Verwertung der Forschungsergebnisse wieder.

Ergebnis zur Analyse für die Magnetfusion:

Im Bereich Magnetfusion ist es für Deutschland ratsam, den **strategischen Fokus auf den Stellarator zu lenken**. Dieser stellt einen strategischen Innovationspfad mit hohem Potenzial dar, in dem Deutschland mit Wendelstein 7-X und zwei Fusionsunternehmen bereits weltweit führend ist.

Der **Entwicklungspfad der Magnetfusion** wird in Abbildung 4 dargestellt und kann grob in drei Bereiche unterteilt werden: Erforschung wissenschaftlicher Grundlagen, Entwicklung von Technologien sowie Integration in ein Kraftwerkssystem. Für die Entwicklung hin zum Kraftwerk bestehen dabei kritische Zwischenziele, und einige wissenschaftliche Themen sind noch ungeklärt.

*Für die skizzierten **Zeitabschätzungen** im Entwicklungspfad der Magnetfusion wurden folgende **Annahmen** zugrunde gelegt:*

Die im Entwicklungspfad aufgeführten Zeitabschätzungen können bei Bündelung der erforderlichen Ressourcen sowie einer massiven Beschleunigung bei der Umsetzung der notwendigen Entwicklungsschritte und Zwischenziele realisiert werden. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass die Zeitabschätzungen von den erzielten Fortschritten des Entwicklungspfades und den Rahmenbedingungen abhängen. Die Angaben sind zudem nicht starr, sondern als dynamische Orientierungswerte zu verstehen, die sich fortlaufend an die Entwicklungen sowie die vorliegenden Rahmenbedingungen anpassen.

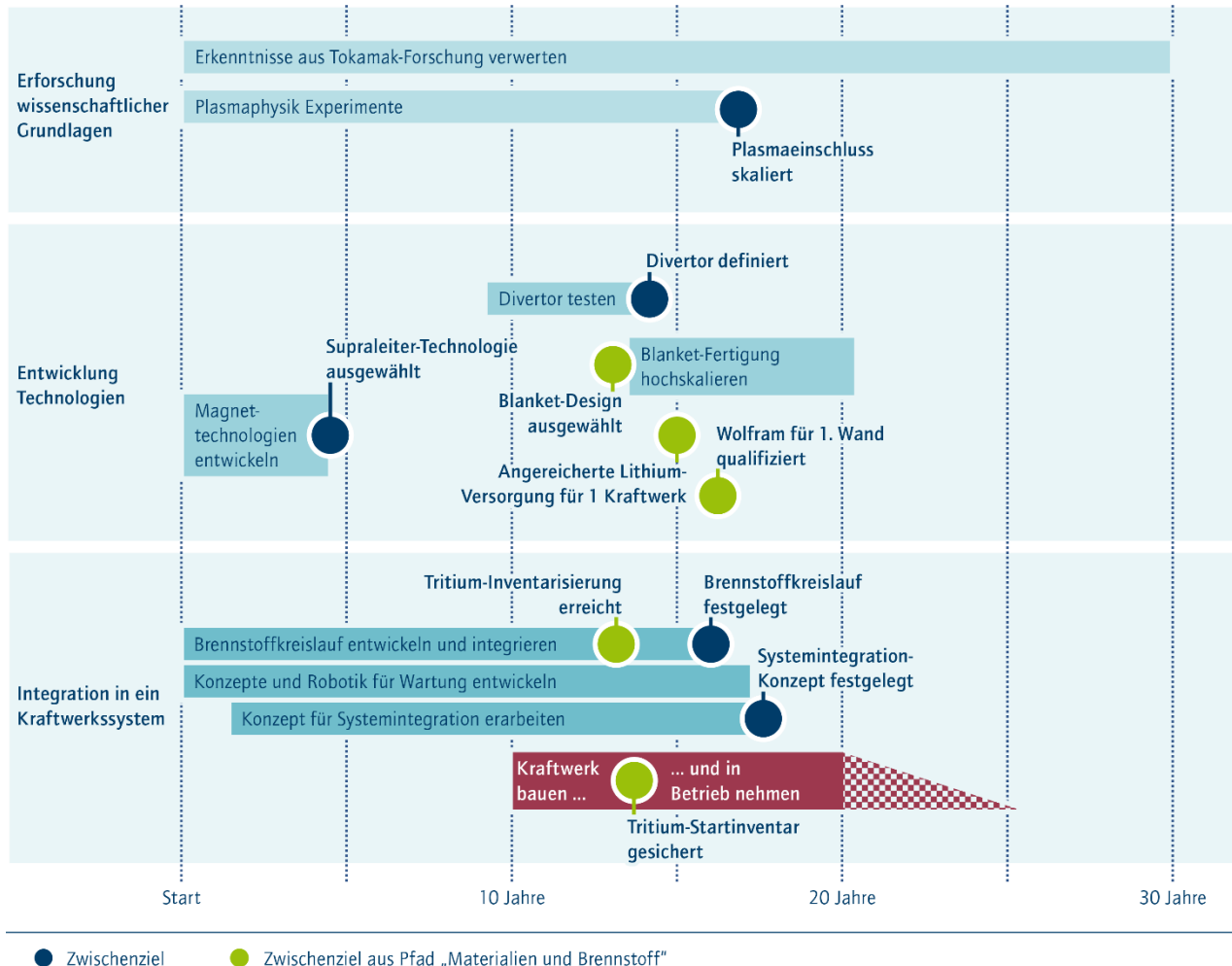


Abbildung 4: Der Entwicklungspfad der Magnetfusion hin zu einem Fusionskraftwerk. Die einzelnen Schritte in der Entwicklung mit unterschiedlicher Länge (horizontale Balken) entsprechen den Zeitabschätzungen der Roadmap. Entlang des Entwicklungspfads stehen notwendige Zwischenziele (blaue Kreise), die abgeschlossen werden müssen, um darauffolgende Entwicklungsschritte angehen zu können. Daneben gibt es Zwischenziele (grüne Kreise), die ebenfalls inhaltliche Abhängigkeiten darstellen, allerdings dem Entwicklungspfad „Materialien und Brennstoff“ angehören. Solange ein solches Zwischenziel nicht innerhalb der Entwicklungen von Materialien und Brennstoff abgeschlossen wurde, stockt auch die Entwicklung des Stellarators. Dies resultiert in einer sequenziellen Bearbeitung dieser Schritte innerhalb des Entwicklungspfads. Zueinander parallel liegende Zwischenschritte können gleichzeitig vorangetrieben werden, sind aber nicht vollständig voneinander losgelöst, da Erkenntnisgewinne sich gegenseitig beeinflussen können (Quelle: eigene Darstellung).

Im Bereich der Erforschung wissenschaftlicher Grundlagen müssen **Plasmabedingungen** etwa auf kraftwerksrelevante Werte skaliert werden. Dafür können einerseits **Erkenntnisse aus der Tokamak-Forschung** übertragen werden, die sich durch eine fortgesetzte Beteiligung an Tokamak-Kooperationen ergeben würde. Daneben sind gleichzeitig **Plasmaphysikexperimente** notwendig, um offene Fragen rund um das Plasma zu klären. Nach erfolgreicher Vollendung dieser Experimente kann ein Zwischenziel zum Kraftwerk, die **Skalierung vom Plasmaeinschluss**, erreicht werden.

Neben der Grundlagenforschung müssen **Technologien der Magnetfusion** weiterentwickelt, Lösungen für Wärme- und Teilchenabfuhr gefunden sowie kritische Komponenten wie die **erste Wand und der Divertor** validiert oder entwickelt werden. Diese Entwicklungen hängen von den Fortschritten in der Wissenschaft ab. Nach Erreichen der Zwischenziele – konkret die Definierung des Divertors und die Auswahl eines Blanket-Designs – kann die **Hochskalierung der Blanket-Fertigung** parallel zu den dann bereits fortgeschrittenen

Plasmaphysikexperimenten angestoßen werden. Darüber hinaus muss die **Magnettechnologie** weiterentwickelt werden. Insbesondere der Reifegrad von Hochtemperatursupraleitern muss erhöht werden, bevor die Entscheidung getroffen werden kann, ob diese oder Niedrigtemperatursupraleiter sich für den Einsatz in einem Kraftwerk eignen.

Im Bereich der Integration in ein Kraftwerkssystem könnten wichtige Technologien parallel zur Entwicklung von Magnettechnologien vorangebracht werden. Konkret können der **Brennstoffkreislauf** und die **Fernwartung** bis zu einem kraftwerkstauglichen Reifegrad gebracht werden und dann in ein Gesamtsystem samt Reaktor integriert werden (**Systemintegration**).

4.2. Laserfusion

Laserfusion gilt als besonderer „**High-Risk, High-Reward**“-Technologiepfad, der Deutschlands bestehende industrielle Führungsrolle im Bereich Lasertechnologie strategisch nutzt und ausbaut. Durch die Skalierung der Lieferketten, den Aufbau der Testinfrastruktur und gezielte Förderung in Fusionsunternehmen kann Deutschland seinen Technologievorsprung aktiv in industrielles Wachstum umwandeln. Laser Drivers und Targets, in deren Bereich Deutschland über eine hervorragende Forschungs- und Industriebasis verfügt, stellen Schlüsseltechnologien für die Fusionsindustrie dar. Die Nutzung dieser Ausgangsposition wird eine frühe **industrielle Führungsrolle** sichern (Häfner et al., 2023). Deutschland kann auf ein breites Netzwerk von Forschungseinrichtungen zurückgreifen, das die Grundlage für eine erstklassige Einrichtung zur Erforschung der Plasmaphysik bei der Interaktion zwischen Laser und Target bilden könnte (Leemans et al., 2023). Derzeit ist die spezifische Forschung zur Laserfusion in Deutschland jedoch weniger weit fortgeschritten als im Ausland.

Laserbasierte Fusionskraftwerke sind, wie Stellarator-Kraftwerke, für einen **kontinuierlichen Betrieb** geeignet, was die Integration ins Energiesystem erleichtert. Zudem erscheinen sie grundsätzlich skalierbar bezüglich der Leistung und sind daher auch als lokale industrielle Energiequelle (ohne Netzgebühren) nutzbar, zum Beispiel in Stahl- und Chemiewerken. Wie weit die Skalierung der Leistung wirtschaftlich tragfähig ist, muss noch geklärt werden. Tabelle 3 fasst die Handlungsoptionen für die Laserfusion zusammen.

Deutschland muss auf den Ausbau von Fachkräften für die Laserfusion setzen. Bis die nötigen nationalen Forschungsinfrastrukturen verfügbar sind, können Partnerschaften mit internationalen Institutionen etabliert werden. So werden **Ausbildungsmöglichkeiten** insbesondere im Bereich Physik und Ingenieurwesen geschaffen. Diese sollten auch Anreize zur Rückkehr der Forschenden enthalten.

Option	Vor- und Nachteile	Ermöglicht
Laser-Target-Forschungsanlage		
Bau einer Forschungsanlage zur Laser-Target Interaktion	Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> • Liefert Grundlagen zur Entscheidung über Zündungsansatz und Target-Design • Liefert Daten für Simulationen • Möglichkeit zur Fachkräfteausbildung Nachteile:	Zündungsansatz, Target-Design Beschleunigt Simulationen

	<ul style="list-style-type: none"> • Unklare Zeitskalen und Kosten, weil abhängig von Entwicklungen in Lasertechnologie 	
Lasertechnologie		
Entwicklungsprogramm für Lasertechnologien	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Erforderlich für Kraftwerk • Basis für Weiterentwicklung von Targets, Entscheidung über Lasertechnologie (DPSSL versus Excimer) und für mögliche Forschungsanlagen • Beschleunigte Industrialisierung durch frühzeitige Einbindung der Zulieferer • Mindert Risiko technologischer Abhängigkeit von internationalen Entwicklungen • Die deutsche Industrie ist führend im DPSSL Bereich <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Technologiepfadrisiko (DPSSL versus Excimer), wenn ein Ansatz im Voraus gewählt 	Lasertechnologie, Zündungsansatz
Massenfertigbare Targets		
Entwicklungsprogramm für Targets	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Erforderlich für Kraftwerk • Expertise-Spillover in andere Industrien • Exportpotential bei internationaler Laserfusion <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Möglicherweise kostspielig bei paralleler Entwicklung mehrerer Ansätze • Riskant bei Vorauswahl eines Ansatzes 	Target-Design und Fertigung, Zündungsansatz
Simulationscodes		
Entwicklung von offenen Rad-Hydro-Codes	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Beschleunigt Erforschung von Laserfusion • Potenzial für Vorreiterrolle 	Beschleunigt Simulationen

	Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> • Daten schwer zu erhalten (Anlagen nötig) 	
--	---	--

Tabelle 3: Zusammenfassung der Handlungsoptionen für die Laserfusion.

Laser-Target Forschungsanlage

Die Erforschung der Laser-Target-Interaktion ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu einem Laser-Fusionskraftwerk. Mehrere Forschungseinrichtungen in Deutschland könnten sich daran beteiligen. Besonders relevant in diesem Kontext sind jedoch das GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung (kurz GSI) in Darmstadt und der European XFEL (kurz EuXFEL) in Hamburg. Die Stärke des ersten liegt in der Expertise auf dem Gebiet der Laser-Materie-Interaktion, während das zweite ein einzigartiges Analyseinstrument bietet.

Option: Bau einer Forschungsanlage zur Laser-Target Interaktion

Kosten: (Datenabfrage ist erfolgt, Bearbeitung wird fortgeführt)

Zeitskala: (Datenabfrage ist erfolgt, Bearbeitung wird fortgeführt)

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Liefert Grundlagen zur Entscheidung über Zündungsansatz und Target-Design • Liefert Daten für Simulationen • Möglichkeit zur Fachkräfteausbildung 	<ul style="list-style-type: none"> • Unklare Zeitskalen und Kosten, weil abhängig von Entwicklungen in Lasertechnologie

Der Laser soll eine hohe **Wiederholungsrate** (> 1 Hertz, idealerweise sogar 10 Hertz) haben. Das vorgeschlagene Konzept ist skalierbar. Die **Energieleistung** liegt zunächst bei niedrigen Werten (1 bis 5 Kilojoule) und steigt mit der Verbesserung der verfügbaren Lasertechnologie (auf bis zu 10 bis 100 Kilojoule). Dadurch werden Fortschritte in der Lasertechnologie berücksichtigt sowie gefördert. Die Experimente sollten sich auf die Physik der Implosion fokussieren, insbesondere beim Direct Drive. Somit würden mögliche Konflikte mit Arbeiten in eingestufteten Sicherheitsbereichen vermieden, die seit Langem in Großanlagen wie NIF oder LMJ erforscht werden. Die vorgeschlagene deutsche Anlage würde stattdessen diese Forschung ergänzen, mit einem dezidierten Fokus auf Fusionsenergie. Durch die hohe Wiederholungsrate liefert diese Anlage deutlich mehr Daten als aktuell verfügbare Laser, was auch zur KI-gesteuerten Optimierung der Implosionsprozesse beitragen könnte.

Diese Anlage bietet ein vertieftes Verständnis zentraler ungeklärter Fragen in der Plasmaphysik der Laserfusion. Diese Erkenntnisse werden künftige Entscheidungen hinsichtlich einer zündungsfähigen Anlage leiten, die wiederum einen erforderlichen Schritt hin zum Kraftwerk darstellt. Die notwendigen Fortschritte in der Lasertechnologie würden in Zusammenarbeit mit der Laser- und Photonik-Industrie Innovationen sowie den Transfer von **Schlüsseltechnologien** vorantreiben und den Aufbau von **Lieferketten** fördern. Eine solche Anlage von Weltklasse bietet schließlich hervorragende **Ausbildungsmöglichkeiten** für Fachkräfte.

Ein möglicher Ort für diesen Laser ist das GSI in Darmstadt. Seine Abteilung für Plasmaphysik konzentriert sich auf heiße dichte Materie sowie die Wechselwirkung zwischen Laser und Materie mithilfe des Hochenergielasers PHELIX. Daher verfügt das GSI bereits über Expertise in den Schlüsselthemen der Laser-Target-Interaktion.

Eine weitere Möglichkeit ist das EuXFEL in Hamburg. Dabei handelt es sich zwar nicht um ein Forschungszentrum mit Hochenergielasern, dennoch ist der EuXFEL als äußerst brillante Quelle von Röntgenstrahlung besonders geeignet für Bildgebung zur Analyse der Interaktion zwischen Laser und Targets. Der zu errichtende Hochenergielaser würde dann auf Targets schießen, und seine Wirkung könnte anhand des XFEL-Lichts mit hoher Präzision untersucht werden.

*Hinsichtlich Geschwindigkeit, erforderlicher Ressourcen und Risiken lässt sich **die Errichtung einer Anlage zur Erforschung der Laser-Target-Interaktion** wie folgt zusammenfassen:*

Geschwindigkeit: Der Bau der Anlage und die Durchführung der Experimente sind zeitaufwendig. Dies verlangsamt die Realisierung eines Laserfusionskraftwerks.

Ressourcen: Eine solche Anlage ist kostenintensiv – unter anderem, weil sie bereits in der frühen Phase modernste Laser erfordert, die noch in der Entwicklung sind. Spätere Phasen mit höheren Energien machen weitere Verbesserungen der Lasersysteme notwendig, was erhebliche zusätzliche Kosten verursacht.

Risiko: Die Ergebnisse dieser Experimente würden das Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Laser und Target erheblich verbessern und grundlegende Daten zur Validierung von Simulationen liefern. Insgesamt würde somit das Risiko für die Realisierung eines Laserfusionskraftwerks deutlich verringert. Darüber hinaus reduzieren diese Ergebnisse die Unsicherheit hinsichtlich des Zündungsansatzes und mindern damit die Risiken bei der Entwicklung von Lasern und Targets.

Lasertechnologie

Option: Entwicklungsprogramm für Lasertechnologien

Kosten:	Ca. 400 Millionen Euro (mit Industriebeteiligung)
Zeitskala:	Ca. 10 Jahre

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Erforderlich für Kraftwerk • Basis für Weiterentwicklung von Targets, Entscheidung über Lasertechnologie (DPSSL versus Excimer) und für mögliche Forschungsanlagen • Beschleunigte Industrialisierung durch frühzeitige Einbindung der Zulieferer • Mindert Risiko technologischer Abhängigkeit von internationalen Entwicklungen • Die deutsche Industrie ist führend im DPSSL Bereich 	<ul style="list-style-type: none"> • Technologiepfadrisiko (DPSSL versus Excimer), wenn ein Ansatz im Voraus gewählt

Ein Laserfusionskraftwerk erfordert Lasersysteme mit einer deutlich höheren Energieleistung, Wiederholungsrate und Effizienz, als es derzeit verfügbare Systeme bieten. Die Entwicklung der Lasertechnologien trägt auch zum besseren Verständnis der wissenschaftlichen Grundlagen der **Laserfusion** bei, da mit fortschreitender Technik in Forschungsanlagen neue Bedingungen erforscht werden können.

Fusionsanwendungen machen alle drei Entwicklungen gleichermaßen notwendig, doch die **Wiederholungsrate** stellt besondere Ansprüche und muss stets im Blick behalten werden. Bei einer niedrigen Wiederholungsrate werden die Kühlsysteme nicht genug beansprucht; das Lasersystem könnte dann grundlegende Anpassungen benötigen oder sich als völlig ungeeignet erweisen, wenn die Wiederholungsrate auf die für ein Kraftwerk erforderlichen 10 Hertz steigen muss – daher empfiehlt es sich, schon bei Demonstratoren eine Wiederholungsrate von **mindestens 1 Hertz anzustreben**.

Deutschland verfügt über eine **Forschungsinfrastruktur für Hochenergielaser**, auch wenn diese nicht speziell auf die Fusion ausgerichtet ist. Außerdem sind hierzulande mehrere weltweit führende Unternehmen im Bereich der Hochenergielaser und der Optik ansässig. Darüber hinaus verfügen das Fraunhofer ILT und das Fraunhofer IOF über weitreichende, weltweit einzigartige Erfahrung bei der Entwicklung und Realisierung von Hochleistungslasern. Auch sind die beiden deutschen **Laserfusionsunternehmen** (Marvel Fusion und Focused Energy) sind an der Entwicklung der Laser Drivers beteiligt, insbesondere zu **Ultrakurzpulslasern**. Im Hinblick auf eine langfristige Industrialisierung und Kommerzialisierung ist hierfür eine enge Zusammenarbeit zwischen öffentlichen Forschungseinrichtungen und Industrie erforderlich. Die Entwicklung der Lasertechnologie würde die bereits **starke Marktposition** Deutschlands im Bereich Hochenergielaser **weiter stärken**. Umgekehrt droht Deutschland ohne Investitionen in diesem Bereich seine Vorrangstellung zu verlieren.

Eine wichtige Entscheidung auf dem Weg zu einem Laserfusionskraftwerk betrifft die Wahl der **Lasertechnologie**, insbesondere zwischen „Diode-Pumped-Solid-State-Lasern“ (DPSSL) und gasbasierten Excimer-Lasern. Diodenlaser gelten als vielversprechender, sind jedoch kostspieliger. Excimer-Laser sind kostengünstiger, aber in der Fusionstechnik weniger verbreitet und erforscht. Eine **parallele Entwicklung** kann dabei Unsicherheiten und Risiken mindern – zumindest, bis der Zündungsansatz feststeht: Ist dieser ausgewählt, lassen sich die Anforderungen an den Laser präzisieren und die am besten geeignete Technologie bestimmen.

Massenfertigbare, befüllbare und wiederholbare Targets

Die Entwicklung von verlässlich zündenden, massenfertigbaren Brennstoff-Targets ist für die Laserfusion **unumgänglich**. Nach der Überwindung dieses kritischen Engpasses ist eine allgemeine Beschleunigung der Entwicklungen in der Laserfusion zu erwarten.

Option: Entwicklungsprogramm für Targets

Kosten:	Ab 200 Millionen Euro
Zeitskala:	8 bis 10 Jahre

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> Erforderlich für Kraftwerk Expertise-Spillover in andere Industrien Exportpotenzial bei internationaler Laserfusion 	<ul style="list-style-type: none"> Möglicherweise kostspielig bei paralleler Entwicklung mehrerer Ansätze Riskant bei Vorauswahl eines Ansatzes

Die **Target-Konzepte sind sehr spezifisch** an die jeweiligen Zündungsansätze (beispielsweise Direct Drive oder Indirect Drive) angepasst. Dementsprechend müssen Targets für unterschiedliche Ansätze **parallel entwickelt** werden, und die Erkenntnisse sind sehr begrenzt übertragbar. Der gewählte **Ansatz prägt auch**

die Kosten für die Entwicklung: Die Targets für Indirect Drive erfordern einen Hohlraum und sind daher deutlich kostenintensiver als die für Direct Drive oder Shock Ignition. Aus diesen Gründen eignet sich die Entwicklung von Targets für einen meilensteinbasierten Public-private-Partnership-Ansatz, in dem spezifische Konzepte gezielt und parallel entwickelt werden.

Deutschland kann in diesem Bereich **weitgehend federführend agieren**. Nationale Forschungseinrichtungen wie etwa Fraunhofer ICT und Fraunhofer IAF sowie private Unternehmen (BRACE, Follmann, BASF SE, Symrise, Koehler In-novation Solutions und Evonik) verfügen über relevantes Fachwissen in der Target-Herstellung (Häfner et al., 2023). Fertigungstechniken mit hohem Weiternutzungspotenzial – beispielsweise additive Fertigung und roboterautomatisierte Mikromontage – werden durch die Entwicklung der Target-Fertigung vorangetrieben.

Simulationscodes

Die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Laser und Ziel erfordert durch experimentelle Daten validierte Simulationen. Die entsprechenden Codes unterliegen meist der Geheimhaltung, weil sie oder ihre Validierungsdaten im Rahmen nicht öffentlicher Experimente entstanden sind.

Option: Entwicklung von offenen Rad-Hydro-Codes

Kosten: 10 Millionen Euro/Jahr

Zeitskala: 5 bis 10 Jahre

Vorteile

- Beschleunigt Erforschung von Laserfusion
- Potenzial für Vorreiterrolle

Nachteile

- Daten schwer zu erhalten (Anlagen nötig)

Deutschland kann zur **Entwicklung offener Simulationscodes** mit europäischen und globalen Partnern zusammenarbeiten. Die dafür benötigte Rechnerinfrastruktur kann sich weitgehend auf bestehende Systeme stützen (zum Beispiel den Jülicher Supercomputer Jupiter).

Abhängig von verfügbaren Experimentalinfrastrukturen und -daten könnte das Vorhaben **in wenigen Jahren** einen validierten Simulationscode liefern, mit **offenem Zugang** für die Laserfusionscommunity. Das würde eine globale Lücke schließen und die Forschung zur Laserfusion sowohl in Deutschland als auch im Ausland deutlich beschleunigen.

Entwicklungspfad

Ausgehend von der Beschreibung und Betrachtung der Handlungsoptionen und Szenarien ergibt sich ein

Ergebnis für die Laserfusion:

Im Bereich der Laserfusion ist es für Deutschland ratsam, **die Entwicklung von Lasertechnologien zu fördern**. Diese dienen sowohl als Enabler für mögliche Forschungsanlagen und weitere technologische Fortschritte als auch als starkes Zeichen und Anreize für die Industrie.

Entwicklungspfad für ein auf Laserfusion basierendes Kraftwerk, sowie die Empfehlung, die Förderung auf die Entwicklung von Lasertechnologien zu fokussieren.

Der **Entwicklungspfad der Laserfusion** wird in Abbildung 5 dargestellt und kann – wie der Entwicklungspfad zur Magnetfusion – grob in drei Bereiche unterteilt werden: Erforschung wissenschaftlicher Grundlagen, Technologieentwicklung und Integration in ein Kraftwerkssystem. Auf dem Weg zum Kraftwerk liegen für die Laserfusion entlang der Bereiche diverse Zwischenziele, die abgeschlossen werden müssen.

*Für die skizzierten **Zeitabschätzungen** im Entwicklungspfad der Laserfusion wurden folgende **Annahmen** zugrunde gelegt:*

Die im Entwicklungspfad aufgeführten Zeitabschätzungen können bei Bündelung der erforderlichen Ressourcen sowie einer massiven Beschleunigung bei der Umsetzung der notwendigen Entwicklungsschritte und Zwischenziele realisiert werden. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass die Zeitabschätzungen von den erzielten Fortschritten des Entwicklungspfads und den Rahmenbedingungen abhängen. Die Angaben sind zudem nicht starr, sondern als dynamische Orientierungswerte zu verstehen, die sich fortlaufend an die Entwicklungen sowie die vorliegenden Rahmenbedingungen anpassen.

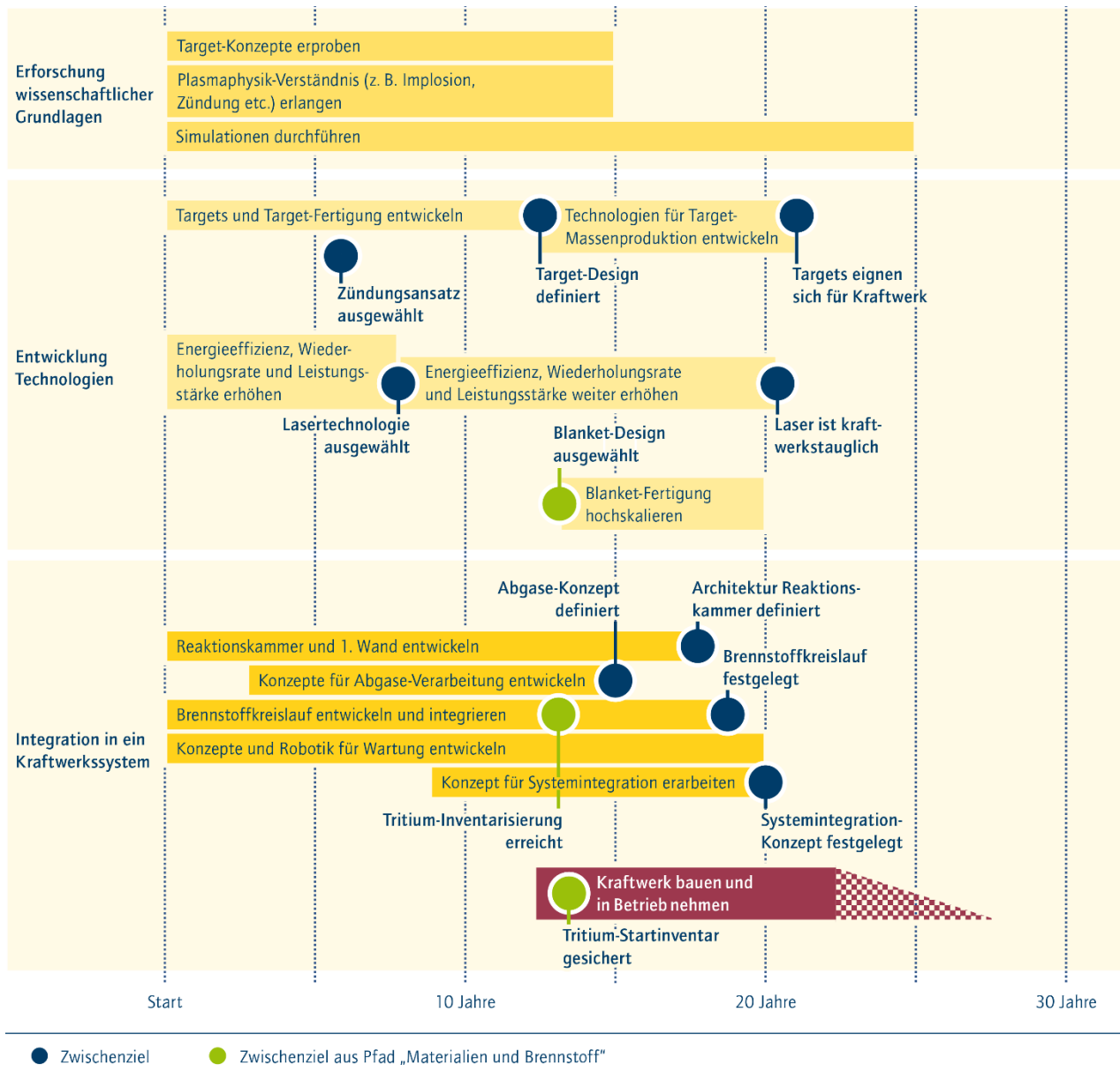


Abbildung 5: Der Entwicklungspfad der Laserfusion hin zu einem Fusionskraftwerk. Die einzelnen Schritte in der Entwicklung mit unterschiedlicher Länge (horizontale Balken) entsprechen den Zeitabschätzungen der Roadmap. Entlang des Entwicklungspfs stehen notwendige Zwischenziele (blaue Kreise), die abgeschlossen werden müssen, um darauffolgende Entwicklungsschritte angehen zu können. Daneben gibt es Zwischenziele (grüne Kreise), die ebenfalls inhaltliche Abhängigkeiten darstellen, allerdings dem Entwicklungspfad „Materialien und Brennstoff“ angehören. Solange ein solches Zwischenziel nicht innerhalb der Entwicklungen von Materialien und Brennstoff abgeschlossen wurde, stockt auch die Entwicklung der Laserfusion. Dies resultiert in einer sequenziellen Bearbeitung dieser Schritte innerhalb des Entwicklungspfs. Zueinander parallel liegende Zwischenschritte können gleichzeitig vorangetrieben werden, sind aber nicht vollständig voneinander losgelöst, da Erkenntnisgewinne sich gegenseitig beeinflussen können (Quelle: eigene Darstellung).

Die **Festlegung des Zündungsansatzes** (zum Beispiel Direct Drive oder Indirect Drive) stellt die zentrale Entscheidung für ein auf Laserfusion basierendes Kraftwerk dar. Stand heute lässt sich nicht eindeutig sagen, welcher Ansatz sich für den Einsatz in einem Kraftwerk am besten eignet; die Vornahme einer Entscheidung ist dementsprechend mit hohen technologischen Risiken verbunden. Im Bereich der wissenschaftlichen Grundlagenforschung kann ein besseres **Verständnis der Laser-Target-Interaktion** mögliche Risiken reduzieren. Dies erfordert wiederum Entwicklungen bei der Lasertechnologie – insbesondere bezüglich

Energieleistung und Wiederholungsrate – sowie eine Schärfung der Target-Konzepte.

Viele Erkenntnisse aus der Plasmaphysik und Entwicklungen für Lasersysteme sind zwischen den beiden Zündungsansätzen Direct Drive und Indirect Drive übertragbar. Basierend auf dem gewählten Zündungsansatz kann eine **Lasertechnologie** (zum Beispiel dioden- oder gasbasiert) festgelegt sowie das **Target-Design** nachgeschärft werden, um die Massenproduktion von Targets zu ermöglichen.

Gleichzeitig müssen **Schlüsselkomponenten für das Kraftwerk** entwickelt werden. Die Reaktionskammer, die Brut-Blankets und der Brennstoffkreislauf sind besonders eng mit Entscheidungen zum Zündungsansatz und den Targets verbunden. Parallel dazu sollten **Fernwartungskonzepte und -robotik** bis zu einem kraftwerkstauglichen Reifegrad gebracht und in ein Gesamtsystem samt Reaktor integriert werden.

4.3. Materialien und Brennstoff

Die Beantwortung offener Fragen in Bezug auf geeignete Materialien, aber auch hinsichtlich der Versorgung mit Brennstoff (Tritium-Erbrütung, Lithium-Anreicherung, Quellen für das Startinventar) sowie dessen Behandlung (Umgang mit Tritium, Brennstoffkreislauftechnologien) stellt eine **kritische Hürde** dar. Fortschritte in diesen Bereichen sind sowohl für die Magnet- als auch für die Laserfusion unabdingbar und treiben sogar häufig meist beide Ansätze gleichzeitig voran. So lassen sich viele Erkenntnisse, insbesondere in Bezug auf Materialien, Lithium-Anreicherung und Tritium-Management, **auf beide Technologien anwenden**. Tabelle 4 fasst die Handlungsoptionen für Materialien und Brennstoff zusammen.

Die **Versorgung mit Tritium** stellt einen kritischen Engpass dar, sowohl bezüglich des Startinventars als auch hinsichtlich der Selbstständigkeit des Normalbetriebs durch Brut-Blankets. Die Entwicklung sämtlicher Brennstofftechnologien ist **essenziell**, um den Betrieb eines Fusionskraftwerks überhaupt zu ermöglichen.

Um das Tritium-Startinventar für ein Kraftwerk zu sichern, müssen **Tritium-Quellen identifiziert werden**. Da in Deutschland keine Schwerwasserreaktoren vorhanden sind, werden **Importe aus dem Ausland** und die entsprechenden Abkommen erforderlich. Angesichts der wachsenden Nachfrage nach Tritium sollten diese Abkommen **schnellstmöglich abgeschlossen** werden. Die einzige Alternative ist eine Tritium-Erbrütung durch lithiumhaltige Erbrütungsstäbe in bestehenden deutschen Spaltungsforschungsreaktoren. Eine **Entscheidung über die Tritium-Quellen** ist zeitnah zu treffen, um das Kraftwerk rechtzeitig versorgen zu können.

Option	Vor- und Nachteile	Ermöglicht
Testinfrastruktur mit fusionspezifischen Neutronen		
IFMIF-DONES-Beteiligung	Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> • Große Infrastruktur bereits im Bau • Geteilte Risiken durch internationale Kooperation • Schließt kritische Lücke bei Testinfrastruktur • Testung von Materialien und Blanket-Modulen möglich 	Qualifizierung von Materialien, Testung von Blankets

	Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> • Langer Zeitrahmen 	
CANSKA-Anlage	Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> • Schließt kritische Lücke bei Testinfrastruktur • Testung von Materialien und Blanket-Modulen möglich • Schnelle Umsetzung 	Qualifizierung von Materialien, Testung von Blankets
„Shine“-Quelle	Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> • Schließt kritische Lücke bei Testinfrastruktur • Gleichzeitige Testung von Materialbeschädigung und Aufnahme von Tritium • Schnelle Umsetzung 	Qualifizierung von Materialien, Tritium-Verfolgung und Inventarisierung
Volumetrische Neutronenquelle (VNS)	Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> • Erprobung von ganzen Komponenten und Blankets bis zu hohem TRL Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> • Hohe Kosten • Lange Zeitskalen • Internationale Kooperationen nötig • Komponententests wenig übertragbar auf Stellarator und Laserfusion 	Qualifizierung von Materialien, Testung von Blankets
Lithium-Anreicherung		
KALiAS-Anlage	Vorteile: <ul style="list-style-type: none"> • Selbstständige Versorgung mit angereichertem Lithium, einem kritischen Rohstoff für die Brut-Blankets • Mögliche Vermarktung des Stoffs und der Technologie • Fertiges Konzept für Pilotanlage, skalierbar auf größere Lieferkette Nachteile: <ul style="list-style-type: none"> • Nutzung von Quecksilber benötigt soziale Akzeptanz und besonderen Rechtsrahmen 	Lithium-Versorgung
Aufbau Infrastruktur für Brennstoffkreislauf		
Aufbau KIT-Tritiumlabor	Vorteile	Tritium-Verfolgung und

	<ul style="list-style-type: none"> • Basisinfrastruktur und Expertise vorhanden • Stärkt deutschen Schwerpunkt im Spezialmaschinenbau 	Inventarisierung
DIPAK-Anlage	Vorteile <ul style="list-style-type: none"> • Anlage im Bau • Basis für Brennstoffkreislauf Nachteile <ul style="list-style-type: none"> • Kein Betrieb mit Tritium 	Brennstoffkreislauf

Tabelle 4: Zusammenfassung der Handlungsoptionen für Materialien und Brennstoff.

Testinfrastruktur mit fusionsspezifischen Neutronen

Die größte Hürde für die Materialtestung und für die Entwicklung von Brut-Blankets besteht darin, Neutronen mit dem **Energiespektrum von Fusionsneutronen** zu benutzen. Diese sind erforderlich, weil sich hochenergetische Neutronen anders auswirken als niedrigenergetische. Nur mit fusionsspezifischen Neutronen können die **Lebensdauer von Komponenten** (insbesondere die erste Wand und die Brut-Blankets) sowie damit wiederum die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit eines Fusionskraftwerks **belastbar eingeschätzt werden**. Ebenso kann die **Erbrütungsfähigkeit** von Brut-Blankets nur mit fusionsspezifischen Neutronen erprobt werden.

Aktuell sind **keine solchen Neutronenquellen verfügbar**. Fusionsspezifische Neutronenquellen würden diese **kritische Lücke** schließen. Einige vorgeschlagene Neutronenquellen (zum Beispiel IFMIF-DONES, CANSKA oder eine volumetrische Neutronenquelle) sollen in der Lage sein, sowohl die **Beständigkeit der Materialien** als auch die **Erbrütungsfähigkeit der Blankets** zu erproben.

Diese Tests sind sowohl für Laser- als auch für Magnetfusion relevant und können zum Teil sogar gleichzeitig beide Pfade vorantreiben. Nach der ersten Testphase der Funktionsmaterialien teilen sich jedoch die Entwicklungspfade für Magnet- und Laserfusion: So wird **kein einheitliches Blanket-Design** für die beiden Technologien anzuwenden sein, ebenso wenig wie für verschiedene Laser- oder Stellarator-Kraftwerkskonzepte. Wengleich dadurch Entwicklungsschritte auf verschiedene Projekte aufgeteilt werden müssen, würde dennoch eine **gemeinsame Testinfrastruktur** eine effizientere Ressourcennutzung ermöglichen.

Die Daten aus diesen Anlagen liefern schließlich die Faktenbasis für eine **Nachschärfung der Regulierung**, etwa zur Lizenzierung von Materialien oder zu Art und Mengen der aktivierten Materialien sowie des radioaktiven Abfalls.

Option: IFMIF-DONES-Beteiligung

Kosten: Ca. 100 Millionen Euro (deutsche Beteiligung)

Zeitskala: Geplante Inbetriebnahme: 2034

Vorteile

- Große Infrastruktur bereits im Bau

Nachteile

- Langer Zeitrahmen

- Geteilte Risiken durch internationale Kooperation
- Schließt kritische Lücke bei Testinfrastruktur
- Testung von Materialien und Blankets-Modulen möglich

Die **IFMIF-DONES** (International Fusion Materials Irradiation Facility – DEMO-Oriented Neutron Source)-Anlage ist ein großes internationales Vorhaben, das sich derzeit im Bau in Spanien befindet – mit einer geplanten Inbetriebnahme im Jahr 2034. Seine Hauptziele sind nukleare **Tests von Materialproben** zur Qualifizierung für den **Einsatz in einem Fusionskraftwerk** sowie die nukleare **Testung von Brut-Blanket-Modulen** (Brut-Fähigkeit, Beständigkeit der Materialien), beides unter fusionsrelevanter Neutronenbestrahlung. Das Projekt wird von der Europäischen Union und Japan vorangetrieben. Deutschland, das sich derzeit nicht direkt an dem Konsortium beteiligt, würde durch eine direkte Beteiligung **Zugang** zu einer großen Anlage für die Bestrahlung mit Fusionsneutronen erhalten, die vielversprechende Aussichten für **wissenschaftliche Ergebnisse** und die **Ausbildung von Fachkräften** bietet. Darüber hinaus würde Deutschland dazu beitragen, die Realisierung des Projekts sicherzustellen und zu beschleunigen.

*Hinsichtlich Geschwindigkeit, erforderlicher Ressourcen und Risiken lässt sich **eine deutsche Beteiligung an IFMIF-DONES ohne die Errichtung von anderen Anlagen** wie folgt zusammenfassen:*

Geschwindigkeit: IFMIF-DONES wird nicht vor 2034 in Betrieb genommen werden. Bis zu diesem Zeitpunkt gibt es keine fusionsspezifischen Neutronenquellen.

Ressourcen: Eine deutsche Beteiligung an IFMIF-DONES ist eine vergleichsweise kostengünstige Option.

Risiko: Sollte es zu Verzögerungen bei IFMIF-DONES kommen, gibt es in diesem Szenario keine Alternative. Dadurch verzögern sich kritische Entwicklungen für das gesamte Kraftwerk.

IFMIF-DONES mit fusionsspezifischen **Neutronenquellen in Deutschland** zu flankieren, könnte die nationale Forschungsinfrastruktur hinsichtlich der nuklearen Effekte für die **Materialcharakterisierung weiter stärken**. Die Errichtung von Fusionsneutronentestanlagen in Deutschland kann die benötigten Tests früher verfügbar machen. Die vorgeschlagenen Anlagen am KIT und am Forschungszentrum Jülich **ergänzen sich gegenseitig**; außerdem **unterstreichen sie die Vorteile** der jeweiligen Einrichtungen. Daher stehen diese Maßnahmen nicht im Widerspruch zueinander, sondern könnten **parallel umgesetzt** werden.

Option: CANSKA-Anlage

Kosten: Ca. 100 Millionen Euro

Zeitskala: 3 bis 5 Jahre

Vorteile

- Schließt kritische Lücke bei Testinfrastruktur
- Testung von Materialien und Blanket-Modulen möglich
- Schnelle Umsetzung

Nachteile

Das KIT hat die Neutronenquelle **CANSKA** vorgeschlagen, die 14-Megaelektronenvolt-Neutronen erzeugen kann. Dadurch werden **Testungen von Materialproben** möglich. Darüber hinaus könnten **Brutmaterialien** (wie Lithium-Keramiken) und Module von Brut-Blankets getestet werden. Dies ergänzt die bei IFMIF-DONES möglichen Tests, liefert dabei jedoch Erkenntnisse in viel kürzerer Zeit. Dadurch wird die Erprobung beschleunigt, und es wird eine höhere Kapazität gewährleistet, sobald IFMIF-DONES voll funktionsfähig ist.

Option: „Shine“-Quelle

Kosten: Ca. 100 Millionen Euro

Zeitskala: Ca. 3 bis 5 Jahre

Vorteile

- Schließt kritische Lücke bei Testinfrastruktur
- Gleichzeitige Testung von Materialbeschädigung und Aufnahme von Tritium
- Schnelle Umsetzung

Nachteile

Das Forschungszentrum Jülich hat die Einrichtung einer **Beschleuniger-D-T-Neutronenquelle („Shine“-Typ)** für Tests mit Fusionsneutronen vorgeschlagen. Hierdurch würden die umfangreichen Testkapazitäten in Jülich ergänzt, sodass auch die **kombinierten Auswirkungen** von Neutronen und hohen Temperaturen oder Tritium getestet werden könnten. Der Schwerpunkt der Studien liegt deshalb auch auf der **nuklearen Plasma-Wand-Wechselwirkung**, wobei insbesondere **Tritium-Rückhaltung** und Erosionseffekte nach Neutronenbestrahlung in der ersten Wand fokussiert werden. Die Neutronenquelle selbst ist kommerziell auf einer Zeitskala von 2 bis 3 Jahren verfügbar.

*Hinsichtlich Geschwindigkeit, erforderlicher Ressourcen und Risiken lässt sich **die Errichtung von fusionsspezifischen Neutronenquellen in Deutschland zur Ergänzung von IFMIF-DONES** wie folgt zusammenfassen:*

Geschwindigkeit: Die nationalen Anlagen können früher als IFMIF-DONES in Betrieb gehen. Außerdem ergänzen sich die Ergebnisse, wodurch schneller ein vollständigeres Bild, als es rein durch IFMIF-DONES möglich ist, entsteht.

Ressourcen: Allein betrachtet ist jede Anlage relativ kostengünstig. Dennoch erhöhen sich die Kosten, wenn mehrere Anlagen gebaut werden müssen. Mit neuen Anlagen könnten auch bestehende nukleare Infrastrukturen, beispielsweise am Forschungszentrum Jülich und am KIT, genutzt und entsprechende Materialuntersuchungen zeitnah umgesetzt werden. Beide Einrichtungen sind bereits in der Materialentwicklung und -testung aktiv, auch im Fusionskontext.

Risiko: Viele der Anlagen gelten als Infrastruktur für die Basisforschung. Diese Anlagen schließen kritische Wissenslücken hinsichtlich der Materialien und der Entwicklung der Blankets. Allerdings sind sie nicht in der Lage, Komponenten oder komplette Blankets zu testen; das muss zunächst in einem Pilotreaktor erfolgen.

Option: Volumetrische Neutronenquelle (VNS)

Kosten: Ca. 1,5 Milliarden Euro für deutsche Beteiligung (von insgesamt ca. 5 Milliarden Euro)

Zeitskala: Nach 2040

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> Erprobung von Komponenten und Blankets bis zu hohem TRL 	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Kosten Lange Zeitskalen Internationale Kooperationen nötig Komponententests wenig übertragbar auf Stellarator und Laserfusion Ergebnisse begrenzt auf Tokamak-Ansatz

Der Bau einer **volumetrischen Neutronenquelle (Volumetric Neutron Source, VNS)** oder ähnlicher Anlagen wird in der Community weiterhin diskutiert. Dieser kompakte Tokamak könnte die Qualifizierung von Nuklearkomponenten, insbesondere von Blankets, unter realistischen Fusionsbedingungen unterstützen, um die Lücke zwischen experimentellen und kommerziellen Fusionsystemen zu schließen (International Atomic Energy Agency, 2025b). Die VNS wäre relevant, wenn die Entwicklung von Blanket-Technologien und Komponenten hin zu hohen TRL-Werten (etwa 7 bis 9) bereits vor dem Bau eines ersten Fusionsreaktors erreicht werden soll (Hernández et al., 2026).

*Hinsichtlich Geschwindigkeit, erforderlicher Ressourcen und Risiken lässt sich **eine umfangreiche Infrastruktur für Neutronentestung mit IFMIF-DONES, deutschen Anlagen und VNS** wie folgt zusammenfassen:*

Geschwindigkeit: Die Europäische Union arbeitet an der Planung einer Anlage mit VNS-ähnlichen Eigenschaften, die allerdings als Nachfolger von ITER vorgesehen ist. Wenn diese als notwendige Vorstufe zum Kraftwerk gilt, verzögert sich der Bau des deutschen Fusionskraftwerks erheblich.

Ressourcen: VNS und ähnliche Anlagen sind sehr kostspielig im Vergleich zu anderen fusionspezifischen Neutronenquellen.

Risiko: Die VNS kann Komponenten und Brut-Blankets zu hohen TRLs bringen, bevor sie in einem Kraftwerk zum Einsatz kommen. So wird das Risiko für den Bau des Fusionskraftwerks deutlich reduziert. Die Ergebnisse zählen hauptsächlich auf Tokamak-Entwicklungen ein und sind kaum auf andere Ansätze übertragbar.

Lithium-Anreicherung

Lithium-Anreicherung ist zentral für die Entwicklung von Brut-Blankets, insbesondere bei den auf soliden Materialien basierenden Ansätzen (das heißt den am weitesten entwickelten, siehe Kapitel 2.4) – setzen die meisten Konzepte für Brut-Blankets doch auf angereichertes Lithium, das im zivilen Bereich **nicht verfügbar ist**. Es fehlt also an einer **zentralen Ressource** für die Herstellung von Brut-Blankets.

Option: KALiAS-Anlage

Kosten:	Ca. 100 Millionen Euro
Zeitskala:	<ul style="list-style-type: none"> • 3 Jahre nach Baubeginn: erste Tonne angereichertes Lithium • zuzüglich 5 Jahre: Lithium für erstes Kraftwerk verfügbar

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Selbstständige Versorgung mit angereichertem Lithium, einem kritischen Rohstoff für die Brut-Blankets • Mögliche Vermarktung des Stoffs und der Technologie • Fertiges Konzept für Pilotanlage, skalierbar auf größere Lieferkette 	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung von Quecksilber benötigt soziale Akzeptanz und besonderen Rechtsrahmen

Die **vorgeschlagene KALiAS-Pilotanlage** bietet Deutschland eine einzigartige Möglichkeit, die Versorgung mit angereichertem Lithium zu sichern. Durch den am KIT entwickelten „ICOMAX“-Prozess kann diese Pilotanlage das **für das erste Kraftwerk notwendige Lithium** liefern. Eine breitere **industrialisierte Lieferkette für Blankets**, die von der Lithium-Anreicherung über die Herstellung von Lithium-Keramik bis hin zur Fertigung vollständiger Blanket-Module reicht, ist jedoch zusätzlich erforderlich.

Langfristig wird eine Skalierung der Herstellung auf mehrere Anlagen erforderlich sein. Dies eröffnet eine große **strategische Chance**, da angereichertes Lithium eine so knappe und so wesentliche Ressource ist. Dadurch ist das Potenzial für die **Vermarktung der Anreicherungstechnologie sowie des angereicherten Lithiums** sehr hoch. Angereichertes Lithium könnte dadurch auch zu einem Rohstoff von allgemeiner Bedeutung für die deutsche Wirtschaft werden. Die Versorgung mit rohem Lithium stellt hier allerdings noch eine Herausforderung dar. Zwar ist Lithium in Deutschland vorhanden, seine Gewinnung ist jedoch im internationalen Vergleich zu kostenintensiv. Dadurch sind aus Kostensicht **Importe aus dem Ausland erforderlich**, wodurch sich aber Abhängigkeiten ergeben.

Für die Lithium-Anreicherung und Handhabung des angereicherten Lithiums ist ein **Rechtsrahmen zu schaffen**. Angereichertes Lithium kann **Proliferationsrisiken** stellen, wenn der Anreicherungsgrad sehr hoch ist. Es sind weitere Vorschriften und vereinbarte Normen erforderlich, um das **zulässige Anreicherungs-niveau** sowie die Handhabung und den Transport der benötigten großen Mengen an Lithium festzulegen. Darüber hinaus verwendet der ICOMAX-Anreicherungsprozess **Quecksilber**. Um den Prozess anzuwenden, ist daher eine **Ausnahmegenehmigung** vom Minamata-Abkommen zu gewährleisten.

Weitere Konzepte für die Lithium-Anreicherung werden derzeit erforscht, insbesondere **quecksilberfreie Verfahren**. Eine parallele Förderung dieser Forschung kann langfristig die ökologische und wirtschaftliche Nachhaltigkeit dieser strategischen Technologie sichern.

*Hinsichtlich Geschwindigkeit, erforderlicher Ressourcen und Risiken lässt sich **die Errichtung von Lithium-Anreicherungsanlagen** wie folgt zusammenfassen:*

Geschwindigkeit: Die vorgeschlagenen Anreicherungsanlagen sollen in wenigen Jahren errichtet werden. Die Versorgung mit Lithium wäre damit kein limitierender Faktor für die Entwicklung eines Fusionskraftwerks. Da aktuell vergleichbare Anlagen im Ausland fehlen,

kann eine deutsche Anlage die Entwicklung von Brut-Blankets und allen Entwicklungspfaden hin zu einem Kraftwerk beschleunigen.

Ressourcen: Der Bau eigener Anlagen zur Lithium-Anreicherung ist mit Anfangskosten verbunden. Die Alternative besteht jedoch darin, bei der Versorgung mit diesem notwendigen Rohstoff auf internationale Partnerschaften angewiesen zu sein, was langfristig zu höheren Kosten führen dürfte. Darüber hinaus ermöglicht diese Option die Vermarktung sowohl von angereichertem Lithium als auch von Anreicherungstechnologie, wodurch in Deutschland Wert geschaffen wird.

Risiko: Das ICOMAX-Verfahren ist erprobt und anwendungsbereit, sodass es mit einem geringen technologischen Risiko verbunden ist. Die einzige Alternative wäre außerdem die Abhängigkeit vom Ausland für eine grundlegende Ressource, was enorme Risiken birgt. Das Umweltrisiko durch die Verwendung von Quecksilber ist aufgrund der geringen Mengen und der strengen geltenden Vorschriften begrenzt.

Aufbau Infrastruktur für Brennstoffkreislauf

Dank der existierenden Forschungsinfrastruktur und Expertise (insbesondere am KIT und am FZJ) befindet sich Deutschland in einer **guten Ausgangslage** für die Entwicklung von Technologien für den **Brennstoffkreislauf**. Das KIT verfügt auch über umfassende spezifische Expertise zum Umgang mit Tritium.

Option: Aufbau KIT-Tritiumlabor

<i>Kosten:</i>	Ca. 25 Millionen Euro
<i>Zeitskala:</i>	(Datenabfrage ist erfolgt, Bearbeitung wird fortgeführt)

Vorteile

- Basisinfrastruktur und Expertise vorhanden
- Stärkt deutschen Schwerpunkt

Nachteile

Ein Fusionskraftwerk muss täglich mehrere Kilogramm Tritium verarbeiten können – in Laboren wird Tritium bislang nur in Grammengen eingesetzt. Aus diesem Grund ist ein Ausbau der Kapazitäten zur Verarbeitung und Analyse im Umgang mit Tritium erforderlich. So lassen sich die Verfahren zur **Inventarisierung** und **Nachverfolgung** von Tritium („Tritium Accountancy“) verbessern. Dies stellt einen zentralen Baustein für die Sicherheit eines Fusionskraftwerks dar. Das Tritiumlabor am KIT verfügt bereits über Expertise und modernste Ausrüstung, benötigt jedoch eine **Erweiterung**, um mit größeren Mengen als den bisherigen 40 Gramm zu arbeiten.

Option: DIPAK-Anlage

<i>Kosten:</i>	(Datenabfrage ist erfolgt, Bearbeitung wird fortgeführt)
<i>Zeitskala:</i>	Inbetriebnahme für 2026 geplant

Vorteile

- Anlage im Bau
- Basis für Brennstoffkreislauf

Nachteile

- Kein Betrieb mit Tritium

Alle Teiltechnologien des Brennstoffkreislaufs müssen weiterentwickelt und geprüft werden; hierfür wurde die **DIPAK-Anlage** am KIT vorgeschlagen. Sie wurde zwar für die großen Tokamaks der europäischen Strategie entworfen, ihre Ergebnisse lassen sich jedoch auch auf andere Fusionsansätze übertragen. Die Anlage soll den gesamten Brennstoffkreislauf in einem integrierten System testen.

*Hinsichtlich Geschwindigkeit, erforderlicher Ressourcen und Risiken lässt sich **der Aufbau von der Forschungsinfrastruktur zum Brennstoffkreislauf** wie folgt zusammenfassen:*

Geschwindigkeit: Die DIPAK-Anlage soll 2026 in Betrieb gehen; das Tritiumlabor des KIT ist bereits in Betrieb. Die Nutzung oder der Ausbau dieser Kapazitäten verzögert daher nicht den Bau des Fusionskraftwerks. Im Gegenteil: Sie beschleunigen die Entwicklung zentraler Technologien wie Tritium-Aufbereitung und Brennstoffkreislauf.

Ressourcen: Diese Optionen erfordern nur geringe Investitionen (im Verhältnis zum Kontext).

Risiko: Da es sich um Forschungsanlagen handelt, bergen sowohl DIPAK als auch Tritiumlabor nur sehr geringe Risiken und verringern sogar das technologische Risiko für den Brennstoffkreislauf.

Deutschland könnte außerdem **internationale Kooperationen** nutzen, um Technologien für die Tritium-Erbrütung, den Brennstoffkreislauf und die Tritium-Behandlung voranzutreiben. Besonders vielversprechend wäre dabei die Zusammenarbeit mit dem **Vereinigten Königreich**, das ein umfassendes Testprogramm gestartet hat. Die für 2028 geplante **LIBRTI-Anlage** konzentriert sich auf die Tritium-Erbrütung mit Untersuchungen von Blanket-Modulen und Tritium-Permeation. Zudem werden durch die Daten von LIBRTI präzise digitale Modelle der Blankets erstellt, um **Simulationen** und den Einsatz Künstlicher Intelligenz zu ermöglichen (U.K. Atomic Energy Authority, 2026). Diese Tests könnten das Potenzial ähnlicher Anlagen in Deutschland **ergänzen und erweitern**. Die für 2030 geplante **H3AT-Anlage** untersucht einen geschlossenen Tritium-Brennstoffkreislauf **im Kraftwerksmaßstab** (U.K. Atomic Energy Authority, 2025c). Sie vereint also an einem Standort Aspekte, die in für Deutschland vorgeschlagenen Optionen getrennt behandelt werden, und vertieft so das Wissen über die Tritium-Behandlung. Auch **Kanada** bietet mit der **UNITY-2-Anlage**, die ebenfalls die Untersuchung geschlossener Brennstoffkreisläufe mit Tritium verfolgt (Kyoto Fusionneering, 2025), Chancen für Kooperationen. In den **USA** ist die **UNITY-3-Anlage** geplant, die sich auf die Tritium-Erbrütung konzentriert (Kyoto Fusionneering, 2026). Beide Anlagen entstehen in Zusammenarbeit mit **Kyoto Fusionneering**. Auch China plant im Rahmen des **BEST-Programms** Tests relevanter Technologien, wenngleich auf den Tokamak beschränkt (siehe Kapitel 2.6). Internationale Kooperationen können also nationale Infrastrukturen **sinnvoll ergänzen** und die Testmöglichkeiten erweitern.

Entwicklungspfad

Die vorangegangene Betrachtung der Optionen und Szenarien rund um Materialien und Brennstoff resultiert

Ergebnis für Materialien und Brennstoff:

Im Bereich Materialien ist es für Deutschland ratsam, **sich an IFMIF-DONES zu beteiligen**. Diese Anlage und andere fusionsspezifische Neutronenquellen überwinden einen kritischen Engpass auf dem Weg zum Fusionskraftwerk. Zur weiteren Beschleunigung können zusätzliche Testanlagen ebenfalls in Betracht gezogen werden.

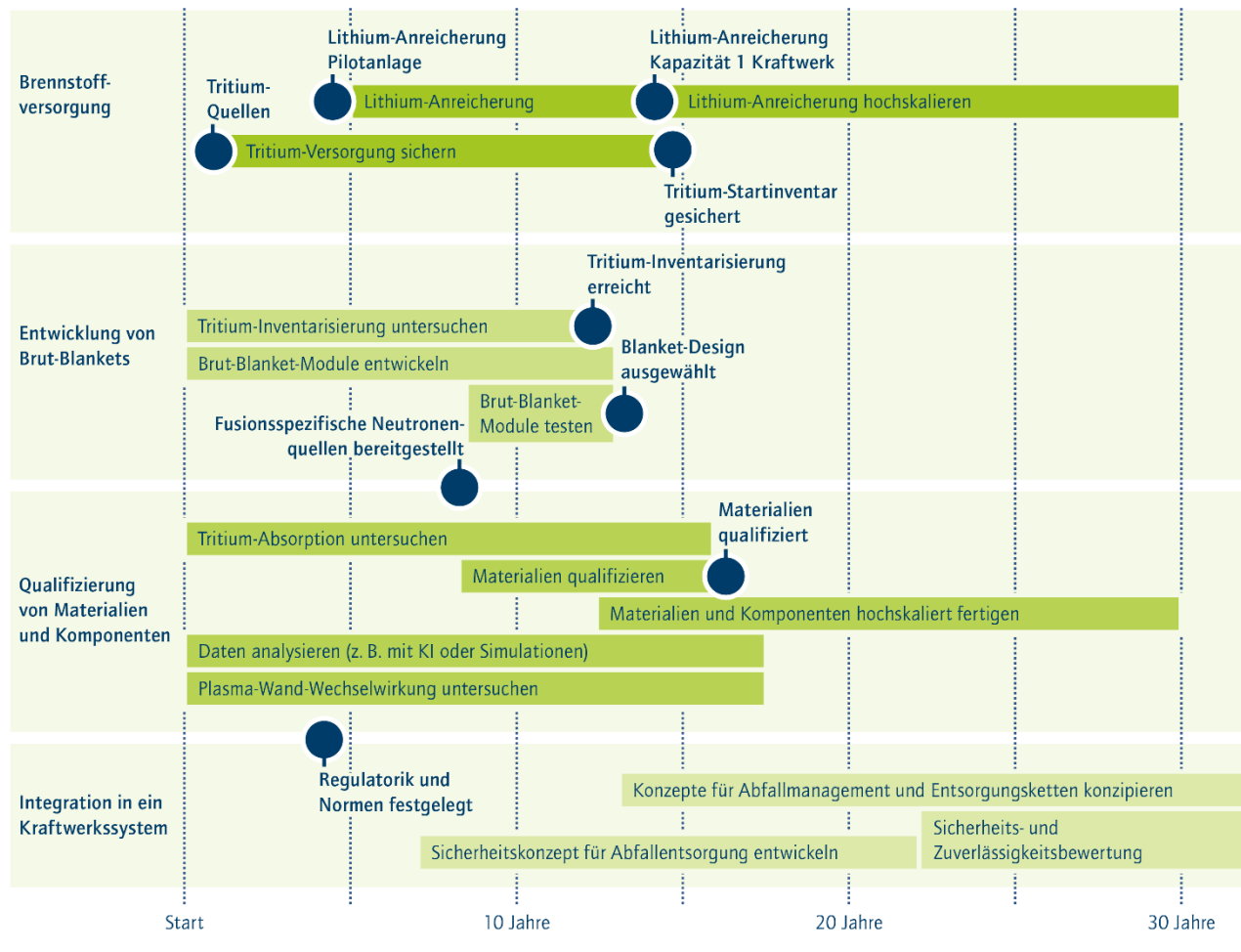
in der Empfehlung einer Beteiligung an IFMIF-DONES. Damit können relevante Aktivitäten innerhalb des Entwicklungspfads Materialien und Brennstoff angestoßen werden.

Der **Entwicklungspfad für Materialien und Brennstoff** wird in Abbildung 6 dargestellt und umfasst verschiedene Stränge, die zum Teil parallel und zum Teil eng miteinander verbunden laufen. Dabei lassen sich die unterschiedlichen Aktivitäten des Pfads grob in vier Bereiche aufteilen: Brennstoffversorgung, Entwicklung von Brut-Blankets, Qualifizierung von Materialien und Komponenten sowie Integration in ein Kraftwerkssystem.

Sowohl die Magnet- als auch die Laserfusion hängen von der Erzielung von Fortschritten bei Materialien und Brennstoff ab, wie die grünen Kreise in Abbildung 4 und Abbildung 5 veranschaulichen. Dabei bestehen inhaltliche Abhängigkeiten vor allem hinsichtlich der Qualifizierung von Materialien, der Lithium-Anreicherung und Tritium. Werden Fortschritte bei Materialien und Brennstoff erzielt, wirkt sich dies somit positiv auf beide Methoden aus, kann aber auch zu Verzögerungen führen, wenn Entwicklungen stocken.

*Für die skizzierten **Zeitabschätzungen** im Entwicklungspfad für Materialien und Brennstoff wurden folgende **Annahmen** zugrunde gelegt:*

Die im Entwicklungspfad aufgeführten Zeitabschätzungen können bei Bündelung der erforderlichen Ressourcen sowie einer massiven Beschleunigung bei der Umsetzung der notwendigen Entwicklungsschritte und Zwischenziele realisiert werden. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass die Zeitabschätzungen von den erzielten Fortschritten des Entwicklungspfads und den Rahmenbedingungen abhängen. Die Angaben sind zudem nicht starr, sondern als dynamische Orientierungswerte zu verstehen, die sich fortlaufend an die Entwicklungen sowie die vorliegenden Rahmenbedingungen anpassen.



● Zwischenziel

Abbildung 6: Der Entwicklungspfad für Materialien und Brennstoff. Die einzelnen Schritte in der Entwicklung mit unterschiedlicher Länge (horizontale Balken) entsprechen den Zeitabschätzungen der Roadmap. Entlang des Entwicklungspfads stehen notwendige Zwischenziele (blaue Kreise). Um darauffolgende Entwicklungsschritte vornehmen zu können, muss zunächst das Zwischenziel geklärt worden sein. Dies resultiert in einer sequenziellen Bearbeitung dieser Schritte innerhalb des Entwicklungspfads. Zueinander grafisch parallel liegende Zwischenschritte können gleichzeitig vorangetrieben werden, sind aber nicht vollständig voneinander losgelöst, da die Erkenntnisgewinne sich gegenseitig beeinflussen können (Quelle: eigene Darstellung).

Die Entwicklung von Brut-Blankets ist eng mit der Qualifizierung von Materialien und Komponenten verbunden, da beide Bereiche fusionsspezifische Neutronenquellen erfordern. Erkenntnisse in diesen Gebieten, etwa zur Tritium-Absorption, fließen in die Erstellung von Konzepten zur **Inventarisierung und Nachverfolgung von Tritium** ein. Nur wenn die Tritium-Inventarisierung erreicht wurde, kann auch ein **Blanket-Design** festgelegt werden. Die Skalierung der Fertigung von Blankets hängt wiederum vom verfügbaren **angereicherten Lithium** ab, für das die Infrastruktur parallel aufgebaut werden könnte. Daneben braucht es **Regulatorik und Normen** für die Lizenzierung von Materialien, den Umgang mit Tritium sowie hinsichtlich Sicherheitsvorgaben für den Kraftwerksbetrieb und das Abfallmanagement. Auch die Identifizierung von **Tritium-Quellen** und die **Sicherung des Startinventars** für das Kraftwerk im Bereich der Brennstoffversorgung sind für den Kraftwerksbetrieb relevant.

4.4. Deutsches Fusionsökosystem

Das Ökosystem der Fusionsenergie vereint Aspekte sowohl aus Forschung und Entwicklung als auch aus der Industrie und beinhaltet ebenso die Regulierung durch die Politik. Eine **ganzheitliche Betrachtung** und Priorisierung der Bedarfe dieses Ökosystems ist für die Entwicklung hin zu einem Fusionskraftwerk in Deutschland entscheidend. Ungeeignete Rahmenbedingungen bergen etwa das Risiko der sukzessiven Verlagerung von Wertschöpfungsketten an Standorte außerhalb Deutschlands sowie der Abwanderung von Know-how ins Ausland. Aus diesem Grund müssen innovationsfördernde und investitionssichernde Rahmenbedingungen frühzeitig auf politischer Ebene festgelegt werden – in Form von **Leitplanken** und **Vereinbarungen**, die das deutsche Fusionsökosystem befähigen.

Rahmen für die Zusammenarbeit

Es sind zahlreiche Akteure aus verschiedenen Bereichen des Fusionsökosystems an der Entwicklung eines Fusionskraftwerks beteiligt. Um eine koordinierte Umsetzung der Aktivitäten durch die diversen Akteure zu gewährleisten, ist ein geeigneter Rahmen für deren Zusammenarbeit erforderlich. Die Einbeziehung dieser Akteure des Ökosystems über eine **staatlich gestützte Zusammenarbeit** kann bei der Realisierung der erforderlichen Zwischenziele auf dem Weg hin zum Fusionskraftwerk relevant sein. Öffentlich-private Partnerschaften beziehungsweise **Public-private-Partnerships (PPPs)** stellen eine wirkungsvolle Kooperationsform zwischen öffentlicher Hand, Wissenschaft und Wirtschaft dar. Bei den in Deutschland entstehenden **Hubs** handelt es sich um eine Form von PPPs: Sie zielen auf die Bündelung der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zu den jeweiligen Themenfeldern auf dem Weg zum Fusionskraftwerk ab.

Zur Stärkung der **technologischen Souveränität** sollten die Aktivitäten im Rahmen einer Zusammenarbeit von Grundregeln und Basisverträgen begleitet werden. Dadurch können **Maßnahmen zur Technologiesicherung** sowie **Verantwortlichkeiten** und **Risiken** über Verträge klar geregelt werden. Die Abwanderung von mit öffentlichen Mitteln entwickelten Technologien, Kompetenzen und Strukturen kann hierdurch eingeschränkt werden.

Die **Ausgestaltung von PPPs** ist dabei eine Schlüsselmaßnahme, um einen geeigneten Rahmen für die Umsetzung des Großprojekts zu schaffen. Beispielsweise können sich **meilensteinbasierte Public-private-Partnerships** durch **staatliche Zielsetzung** und **Ergebnisorientierung** („Stage-Gate-Logik“) anbieten. Diese Form von PPPs zielt auf bestimmte technologische Fortschritte ab und ermöglicht es dem Staat, frühe technologische Risiken mit den Beteiligten des Vorhabens zu teilen.

Sicherung und Erschließung von geistigem Eigentum (**Intellectual Property, IP**) müssen für die Aktivitäten im Rahmen von PPPs geklärt werden. Dabei sind transparente Regelungen zu etablieren – zum Beispiel, dass vorwettbewerbliche Ergebnisse (zum Beispiel Basis-Simulationscodes, Materialdaten oder Standardmessverfahren), wo möglich, offen oder teiloffen bereitgestellt werden müssen. Unternehmen könnten wirtschaftlich verwertbare Schutzrechte behalten, während der Staat angemessene Nutzungsrechte zur Sicherung des staatlichen Interesses bekommen könnte. Regelungen zum Schutz der IP stärken die Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit aller Beteiligten und zahlen auf die Technologiesicherung ein. Dies fördert ein innovationsfreundliches und agiles Handeln durch die Unternehmen und stärkt auch die Möglichkeiten einer potenziellen Vermarktung von Technologien.

Planung vom Kraftwerk aus: Systemintegration

Im Sinne eines ganzheitlichen Ansatzes, **vom Kraftwerk aus zu planen**, sollten **Kraftwerksbauer** von Beginn an miteinbezogen werden. Bestimmte technische Aspekte sind erst im Gesamtsystem eines Fusionskraftwerks realisierbar, womit notwendige Entwicklungsprozesse für die **Systemintegration** (Zusammensetzung der erforderlichen Teilsysteme zu einem Gesamtsystem) heute unklar sind. Gleichwohl müssen regulatorische Aspekte für die Systemintegration von Anfang an bei der Planung berücksichtigt werden. Nicht zuletzt ist ein Fusionskraftwerk eine nukleare Anlage, weshalb allein aus Sicherheitsgründen das Gesamtkonzept stets mitgedacht werden muss.

Neben der Systemintegration sind von Beginn an Überlegungen zum Betreibermodell empfehlenswert – das Betreibermodell für das angestrebte Kraftwerk stellt einen wesentlichen Teil des Wettbewerbsrahmens dar. Eine **frühzeitige Festlegung des Betreibermodells** erscheint als sinnvolle Leitplanke.

Die **Standortwahl** des Fusionskraftwerks ist frühzeitig vorzunehmen. Hier kann zwischen **Greenfield- und Brownfield-Optionen** abgewogen werden; sowohl gesellschaftliche (etwa die soziale Akzeptanz in der Bevölkerung) als auch technische Anforderungen (etwa eine bereits bestehende Netzinfrastruktur) wirken dabei auf die Wahl ein und sind entsprechend zu berücksichtigen. Es ist zu prüfen, inwiefern die Länder hierbei eingebunden werden sollten.

Regulierungsrahmen

Neben der Entwicklung eines Rahmens für die Zusammenarbeit kann ein **Regulierungsrahmen** für den Bau und die Entwicklung eines Kraftwerks (technische Ebene) geschaffen werden. Regulatorische Erfordernisse stehen zwar nicht im Fokus der vorliegenden Betrachtung – wenn fehlende Regulatorik jedoch die technische Entwicklung hemmt, wird darauf hingewiesen. Zur Entwicklung eines technischen und rechtlichen regulatorischen Rahmens wurden bereits Aktivitäten angestoßen. Das vom BMFTR geförderte **Forschungsprojekt „Pilotvorhaben zur Regulatorik für Fusionsanlagen (ReFus)“** (Laufzeit bis Mitte 2026) erarbeitet rechtliche Rahmenbedingungen und prüft strahlenschutztechnische Vorschriften für Fusionsanlagen (BMBF, 2025).

Eine konkrete Regulierung erfordert eine zugrunde liegende **Datenbasis**, die jedoch zurzeit noch unvollständig ist, weil einige Daten an technologische Entwicklungen geknüpft sind. Die Regulierung sollte frühzeitig angestoßen und durch einen **iterativen Prozess** an die jeweils aktuellste Datenlage angepasst werden.

Neben Regulatorik sind auch **Normen** unverzichtbar, anhand derer die Kompatibilität der verschiedenen Technologien in einem Fusionskraftwerk sichergestellt werden soll. Die Technologien, die in ein Fusionskraftwerk eingebaut werden, müssen in einem Regelwerk, das über Normen abgebildet wird, zueinanderfinden. Entsprechende Normenpakete wurden bereits von Ländern wie Frankreich oder China auf den Weg gebracht; Deutschland sollte ebenfalls Normen für dieses Vorhaben formulieren. Dabei ist eine ganzheitliche Betrachtung von Normen für das Vorhaben Fusionskraftwerk erforderlich, weshalb die Normentwicklung in den ersten zehn Jahren bei der Systemintegration berücksichtigt werden und alle Beteiligten einbezogen werden sollten. Die Systemintegration erfolgt zwar erst zu einem späteren Zeitpunkt, gleichwohl entstehen Designs zu Komponenten, die unmittelbar auf Schnittstellen und die Systemtauglichkeit einwirken, bereits am Anfang der Entwicklungsschritte hin zum Fusionskraftwerk. Durch Normen und Standards können Nachteile, die sich durch proprietäre Systeme ergeben könnten, eingeschränkt werden. Die **Sicherung von Know-how und Expertise** sollte in Normen durch die Einbringung der Industrie abgebildet werden.

Schließlich sind auch Aspekte der **Lizenzierung** eines Fusionskraftwerks – insbesondere zu Materialien, Standortfragen sowie Strahlenschutz – mittels eines entsprechenden regulatorischen Rahmens abzubilden. Zusätzlich ist das **Exportkontrollrecht zu prüfen**, um etwa den Einsatz von und den Umgang mit Tritium oder neutronenbestrahlten Materialien rechtskonform zu gestalten.

Die regulatorischen Grundlagen werden für den Bau und den zukünftigen Betrieb eines Fusionskraftwerks sowie für die Sicherung der Wertschöpfung und des Know-hows geschaffen. Damit werden für alle Beteiligten Investitionsrisiken reduziert, Planungssicherheiten erhöht sowie internationale Kooperationen gestärkt.

Marktaufbau in kritischen Schlüsseltechnologien

Die Fertigung der Komponenten braucht ab dem ersten Kraftwerk eine Industrialisierung. Bereits bei der Planung eines ersten Kraftwerks könnten Partnerschaften mit der Industrie geschlossen werden, um eine Erweiterung der Fertigungskapazitäten vorzusehen. Das sichert den nahtlosen Übergang der Forschungs- und Entwicklungsergebnisse in eine industrielle Umgebung; damit können Technologien im **großen Maßstab getestet, validiert und optimiert** werden. Außerdem werden Fusionskomponenten gezielt hochskaliert. Hierzu sind Hochtemperatursupraleiter, Gyrotrons, fusionsspezifische Stähle, Blanket-Materialien mit angereichertem Lithium, Hochenergielaser und Brennstoff-Targets von Bedeutung. Die ersten Kraftwerke dienen **als Brücke zwischen öffentlich finanzierter Forschung und kommerziellem Einsatz** im industriellen Maßstab. Für diese Technologieentwicklung bis zur Industrialisierung ist eine Zusammenarbeit mit **europäischen Schlüsselpartnern** (vor allem Italien, Dänemark, Niederlande, Frankreich, Norwegen) anzuraten. Eine ausschließliche Konzentration auf komponentenorientierte Anwendungen (Wimmers et al., 2025; Dering et al., 2026) erscheint allerdings angesichts des aktuellen Entwicklungsstands nur eingeschränkt zielführend zu sein.

Der Bau des ersten Fusionskraftwerks wird Investitionsbeteiligungen von **strategischen staatlichen und privaten Investoren** erfordern. Weil sich viele der nötigen Technologien noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden, sind jedoch Großunternehmen und wichtige Industrieakteure noch nicht bereit, große finanzielle Verpflichtungen einzugehen. Der Aufbau eines deutschen **Fusionsökosystems** wird daher in der Anfangsphase erhebliche öffentliche Investitionen erfordern. Durch Vorbestellungen, Rahmenverträge und volumenklare Ausschreibungen für die PPPs kann der **Staat vorübergehend als Ankerkunde** in den frühen Entstehungsphasen des Ökosystems auftreten – so werden Anreize für private Akteure geschaffen. **Klare Nachfragesignale, Pfade zur Risikominderung und langfristige Planbarkeit** senken die Investitionsrisiken für die Industrie und das gesamte Ökosystem. Insgesamt trägt diese Reihe von Maßnahmen zur technologieoffenen Entstehung wettbewerbsfähiger Märkte bei.

Mit hohen öffentlichen Investitionen wird es umso wichtiger, die Technologiesicherheit zu gewährleisten. Dazu zählt der Schutz von geistigem Eigentum sowie von technologischem und industriellem Know-how, um die gewachsenen Fertigungskapazitäten in Deutschland zu sichern. So bleibt die Chance bestehen, die gesamte Wertschöpfungskette voll zu nutzen.

5. Fazit und Schlussfolgerungen: Szenarien für ein deutsches Fusionskraftwerk

Fusionsenergie kann als nahezu unerschöpfliche **klimaneutrale Energiequelle** wesentlich zur zukünftigen Energieversorgung beitragen. Ferner kann mit dem Erschließen dieser Zukunftstechnologie ein bedeutender Beitrag zur Sicherung des **Wohlstands des Wirtschaftsstandorts Deutschland** geleistet werden. Im globalen Wettbewerb um die Realisierung eines funktionsfähigen Fusionskraftwerks sollte Deutschland eine **führende Rolle** einnehmen, da die **Ausgangslage** dank international anerkannten Forschungsinstituten, dynamischen Fusionsunternehmen und einer leistungsfähigen Industrie **sehr gut** ist. Deutschland hat daher das Potenzial, bei der Fusionsenergie durch überlegtes politisches Handeln seine wissenschaftliche Spitzenposition auszubauen und in wirtschaftliche Erfolge zu überführen.

Die erfolgreiche Entwicklung eines technologisch wie wirtschaftlich tragfähigen Fusionskraftwerks ist allerdings weiterhin mit erheblichen Herausforderungen verbunden. Dabei weist der Fusionsstandort Deutschland viele der notwendigen **Voraussetzungen** auf, um diese Herausforderungen zu meistern. Dazu zählen eine breite und aktive **Community aus Wissenschaft und Wirtschaft** sowie eine **weltweit führende Forschungsinfrastruktur** mit langjähriger Erfahrung in der Fusionsforschung. Gemessen an der Anzahl von **Fusionsunternehmen** hat Deutschland global eine sehr gute Position inne; eine **starke industrielle Basis** liegt sowohl auf der Zulieferer- als auch auf der Kraftwerksbauerseite vor. Auf politischer Ebene gibt es ein klares **Commitment und eine eindeutige Zielsetzung** zur Errichtung eines ersten Fusionskraftwerks in Deutschland. Dieses Großprojekt lässt sich aber nicht ohne internationale Einbindung umsetzen: Für die Ausschöpfung der vorliegenden Stärken und Ressourcen sind **Kooperationen mit internationalen und vor allem europäischen Partnern** wesentlich. Eine effiziente und zielgerichtete Zusammenarbeit unter deutscher Führung kann einen wesentlichen Beitrag auf dem Weg zu einem Fusionskraftwerk leisten.

Fahrplan zu einem Fusionskraftwerk

Wissenschaftlich betrachtet gibt **es keinen Grund, warum die Fusion nicht gelingen sollte**. Allerdings müssen, wie in Kapitel 3 gezeigt, **zahlreiche technologische Herausforderungen** noch geklärt werden. Abbildung 7 zeigt die **notwendigen Zwischenziele** auf dem Pfad zum Kraftwerk für die Laser- (gelb) und die Magnetfusion (blau) sowie Ziele, die zu beiden Pfaden gleichzeitig beitragen (grün). Die Pfeile zeigen die Abhängigkeiten zwischen den Entwicklungen: Erst wenn ein Ziel geklärt wurde, können die mit ihm verbundenen Schritte ebenfalls geklärt werden – obwohl sie schon früher angegangen werden können. So soll die **Integration** von Komponenten und Teilsystemen zu einem Kraftwerk fortlaufend berücksichtigt und weiter vorangetrieben werden, kann aber nur abgeschlossen werden, nachdem alle Technologien und Teilsysteme entwickelt worden sind.

Aufgrund der in Abbildung 7 dargestellten Abhängigkeiten und der in Kapitel 4 skizzierten Zeitabschätzungen lassen sich nach **aktuellem Stand** und unter **derzeit herrschenden Bedingungen** Zeithorizonte ableiten. Nach dieser Analyse wird die **Inbetriebnahme eines Fusionskraftwerks bis 2045** nur durch eine massive Beschleunigung möglich – das gilt insbesondere für die Ausbildung von **Fachkräften**, die Errichtung von **Neutronenquellen**, die Entwicklung von **Brut-Blankets** und die **Industrialisierung** der Komponentenfertigung. Sollten diese Maßnahmen nicht zeitnah ergriffen werden, ist mit Verzögerungen von mindestens **5 bis 10 Jahren** zu rechnen. Gleichzeitig ist jedoch auch eine **weitere Beschleunigung grundsätzlich möglich**, geht jedoch mit einem deutlich erhöhten Ressourceneinsatz und Risiko einher.

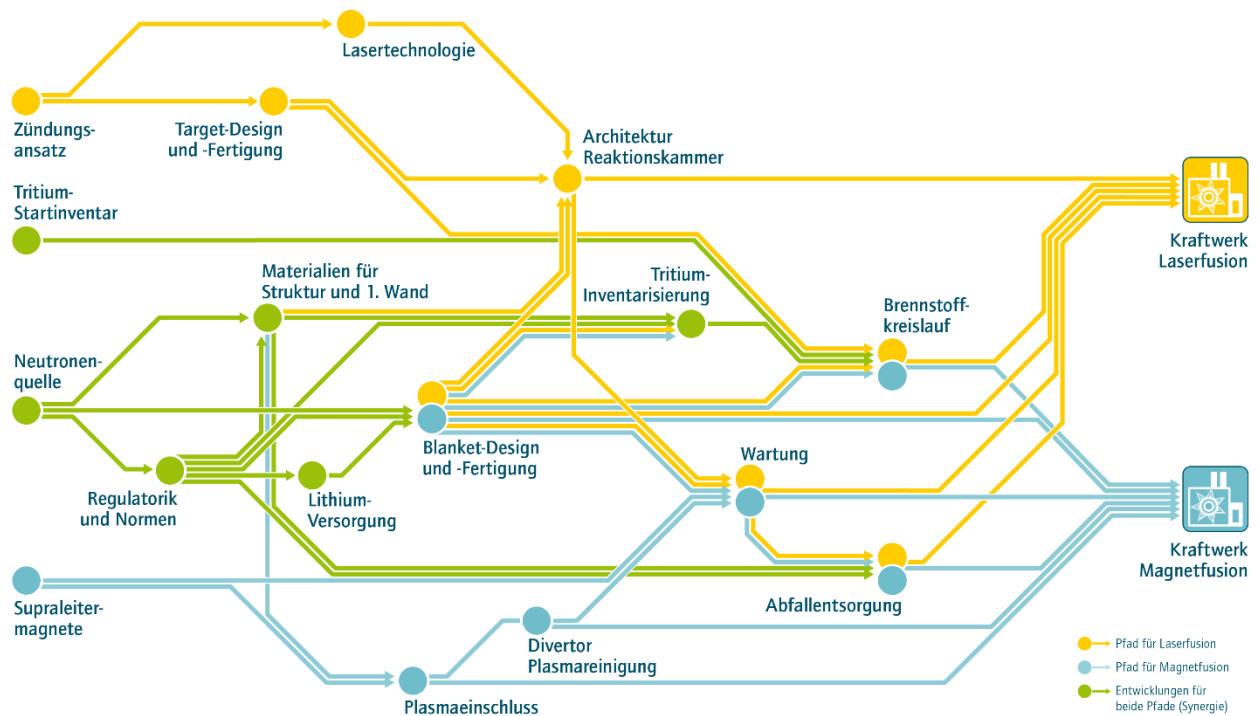


Abbildung 7: Der Netzplan bildet notwendige Zwischenziele für den Laserfusionspfad (gelb) und den Magnetfusionspfad (blau) sowie solche Ziele ab, die beide Pfade synergetisch vorantreiben (grün). Jeder Pfeil visualisiert die Abhängigkeiten zwischen Zielen auf dem Weg hin zu einem Fusionskraftwerk: Jedes kann erst geklärt werden, nachdem die damit in Verbindung stehenden Ziele abgeschlossen wurden (Quelle: eigene Darstellung).

Drei Szenarien für die Umsetzung

Um die wichtigsten Zwischenziele aus Abbildung 7 sowie die relevanten Akteure frühzeitig zu identifizieren, ist es zielführend, die Schritte **vom funktionstüchtigen Kraftwerk aus rückwärts** zu planen. Die Wahl von **Geschwindigkeit, Ressourcenverfügbarkeit und Risiko** prägt dann die Umsetzungsdynamik. Damit ergeben sich auch dringende Entscheidungsbedarfe auf politischer Ebene: Festlegung von **Risiko und Geschwindigkeit** für die Umsetzungsdynamik auf Basis der eingesetzten finanziellen und zeitlichen Ressourcen, Ermittlung und Ausarbeitung von **Grundregeln** zur Koordinierung der Entwicklungen sowie Maßnahmen zur **Sicherung der Technologie** in Deutschland.

Aus den möglichen Priorisierungen lässt sich die Umsetzung der Entwicklungsschritte in den folgenden drei Szenarien abbilden.

Szenario 1: Priorität auf Umsetzungsgeschwindigkeit

In diesem Szenario werden die Entwicklungen wettbewerbsfähig und möglichst parallel umgesetzt. Die agile Herangehensweise soll zu einer **schnelleren Zielerreichung** führen.

Das Szenario ist mit einem **erhöhten Kostenaufwand** verbunden – insbesondere, wenn mehrere Umsetzungen parallel beauftragt und verfolgt werden, weil viele Mittel schon frühzeitig bereitgestellt werden. Denn Parallelität **reduziert das strategische Risiko** und **erhöht die Chance**, robuste Lösungen zu identifizieren, geht jedoch mit einem **erhöhten organisatorischen Aufwand** einher, der politisch abzuwägen ist.

Andererseits werden in diesem Szenario Ansätze verfolgt, bevor umfassende **wissenschaftliche Grundlagen** für sie vorliegen. Demzufolge **steigen die technologischen Risiken** – vor allem, wenn die verfügbaren Ressourcen nicht ausreichen, um entlang mehrerer Ansätze parallel fortzufahren.

Die **Fusionsstrategie der USA** stellt ein Praxisbeispiel für dieses Szenario dar: Die USA besitzen eine starke Forschungsinfrastruktur, überlassen die technologische Entwicklung der Fusion jedoch weitgehend **privaten Unternehmen**. Diese treiben ihre Technologien **schnellstmöglich** voran, um rasch Gewinne für ihre Investoren zu erzielen. Dabei stützt sich die Finanzierungslandschaft **stark auf Privat- und Wagniskapital** und unterscheidet sich deutlich von den Verhältnissen in Deutschland.

Szenario 2: Priorität auf Risikominderung

In diesem Szenario wird **zunächst die Grundlagenforschung** gefördert, um weitere Maßnahmen auf Basis der wissenschaftlichen Erkenntnisgewinne zu entscheiden. Nur die letzten Schritte der Kraftwerksrealisierung werden wettbewerbsmäßig angegangen.

Dieser Pfad ist finanziell **ressourcenschonender** und mit **geringerem Risiko** verbunden. Weil die wissenschaftlichen Grundlagen und die Entwicklung von Teilkomponenten im Vorfeld geklärt werden, **sinken die Risiken** beim Kraftwerksbau stark. Darüber hinaus werden technologische Zwischenschritte durch gemeinsame Forschungsgeräte statt durch (gegebenenfalls mehrere) Technologiedemonstratoren erzielt.

Die wissenschaftlichen Grundlagen müssen in diesem Szenario für jeden Entwicklungsschritt weitmöglichst geklärt werden, bevor das nächste Zwischenziel angegangen werden kann. Dementsprechend geht das Szenario mit einem **deutlich erhöhten Zeitaufwand** einher und könnte zudem dazu führen, dass **Marktpotenziale nicht erschlossen** werden.

Die **bisherige EUROfusion Roadmap** (EUROfusion, 2018) dient als Praxisbeispiel für dieses Szenario. Dabei sollte **ITER** die Fragen der Plasmaphysik umfassend klären und Vortestungen für unter anderem Blankets durchführen. Dazu sollte womöglich eine VNS gebaut werden, um Materialien und Blankets **bis zu hohen TRLs zu validieren**. Nur danach könnte ein erster Kraftwerksdemonstrator (DEMO) gebaut werden, der jedoch **nicht unmittelbar zur Kommerzialisierung** führen würde. Aufgrund von Verzögerungen und der beschleunigten Entwicklungsdynamik der Fusion wird diese Strategie aktuell **überarbeitet**.

Szenario 3: Priorität auf Ökosystemaufbau

In diesem Szenario wird eine **vorwettbewerbliche Forschungsinfrastruktur** kooperativ aufgebaut und benutzt, um gemeinsame wissenschaftliche Hürden zu überwinden. Die Entwicklungen für **spezifische Teiltechnologien** werden innerhalb wettbewerbsmäßiger Programme (beispielsweise meilensteinbasierter PPPs) von industriellen Konsortien realisiert.

Dieses Szenario liegt hinsichtlich Umsetzungsgeschwindigkeit, Ressourcennutzung und Risiken zwischen den beiden vorher genannten. Es strebt vor allem an, Risiken in einem **ausgewogenen Ökosystem** zu verteilen und eine „Winner-takes-all“-Dynamik zu verhindern, bei der ein Akteur die dominante Rolle übernimmt. Stattdessen **befähigt es die Fusionsunternehmen** und stärkt deren **Zusammenarbeit** mit Forschungseinrichtungen, der Zulieferindustrie und den Kraftwerksbauern.

Beispielsweise wird im **Vereinigten Königreich** im Rahmen des **öffentlich finanzierten STEP-Programms** die Zusammenarbeit zwischen Forschung, Zuliefererindustrie und Fusionsunternehmen orchestriert (Department for Energy Security & Net Zero, 2023). Mit einer **übergreifenden Koordination** wird die

Zusammenarbeit zwischen Interessengruppen, Projekten und Ansätzen verstärkt.

Drei „No-regret“-Optionen als Schlüsselmaßnahmen umsetzen

Auf der Technologieebene müssen die begrenzten Ressourcen auf vielversprechende Stränge gebündelt werden. Grundlegend dabei ist der Ausbau der **Testinfrastruktur mit fusionsrelevanten Neutronenquellen** (IFMIF-DONES und gegebenenfalls Anlagen in Deutschland), um die kritischen Wissenslücken in Bezug auf Materialien zu schließen sowie die Testung von Brut-Blankets zu ermöglichen. Im Bereich der Magnetfusion bietet der **Stellarator** erfolgversprechende Voraussetzungen, da er sich aufgrund der Möglichkeit zum Dauerbetrieb besser als der Tokamak für den Einsatz in einem Kraftwerk eignet und Deutschland derzeit eine Spitzenposition in dieser Technologie innehat. Die **Weiterentwicklung der Lasertechnologie** ebnet den Weg für alle weiteren Schritte entlang des Pfads der Laserfusion und bietet zahlreiche Möglichkeiten für Spillover-Effekte. Die **kontinuierliche Berücksichtigung der Integration in ein Gesamtsystem (Systemintegration)** erlaubt sowohl für die Magnet- als auch für die Laserfusion eine zielgerichtete Entwicklung und sollte von Anfang an mitgedacht werden.

Die empfohlenen Maßnahmen lassen sich als „No regrets“ bezeichnen. Diese Schlüsselmaßnahmen tragen wesentlich dazu bei, die ersten in Abbildung 7 dargestellten Zwischenziele entschlossen anzugehen, und lassen sich entsprechend der erzielten Geschwindigkeit, den verfügbaren Ressourcen und dem annehmbaren Risiko unterschiedlich umsetzen. Tabelle 5 fasst die Empfehlungen zusammen und vergleicht sie qualitativ bezüglich Geschwindigkeit der Umsetzung, Anspruch an Ressourcen und eingegangenem Risiko.

	Empfehlung	Optionen für die Umsetzung	Geschwindigkeit, Ressourcennutzung, Risiko
Magnetfusion	Stellarator für die Magnetfusion priorisieren	Forschungsstellarator als Zwischenschritt	Geschwindigkeit: ▼ Ressourcen: ▲ Risiko: ▼
		Technologiedemonstrator als Zwischenschritt	Geschwindigkeit: ◇ Ressourcen: ◇ Risiko: ◇
		Direkte Kraftwerksentwicklung	Geschwindigkeit: ▲ Ressourcen: ▼ Risiko: ▲
Laserfusion	Lasertechnologie entwickeln	Plasmaphysik bestimmt Zündungsansatz	Geschwindigkeit: ▼ Ressourcen: ▲ Risiko: ▼
		Zündungsansatz im Voraus festlegen	Geschwindigkeit: ▲ Ressourcen: ▼ Risiko: ▲
Materialien	Infrastruktur für Neutronentestung aufbauen	Nur Beteiligung an IFMIF-DONES	Geschwindigkeit: ◇ Ressourcen: ▼ Risiko: ▲

		IFMIF-DONES mit nationalen Anlagen flankieren	Geschwindigkeit: ▲ Ressourcen: ◇ Risiko: ◇
		Ganze Palette der Neutronenquellen, inklusive VNS	Geschwindigkeit: ▼ Ressourcen: ▲ Risiko: ▼

Tabelle 5: Zusammenfassung der Empfehlungen aus Kapitel 4, mit den jeweiligen Optionen für die Umsetzung. Hinsichtlich Geschwindigkeit der Umsetzung, Anspruch an Ressourcen und eingegangenem Risiko werden die Optionen mit den höchsten Werten (▲), den niedrigsten Werten (▼) und gegebenenfalls mittleren Werten (◇) für jede Empfehlung gekennzeichnet.

Das deutsche Fusionsökosystem befähigen

Laut der deutschen Fusionscommunity ist ein geeigneter **Regulierungsrahmen** für die Entwicklung und den Bau eines Fusionskraftwerks unverzichtbar. Zu diesem Zweck gibt es bereits anlaufende Aktivitäten im **Projekt ReFus**, das die Ausarbeitung rechtlicher Rahmenbedingungen adressiert. Ergänzend hierzu sind **Normen** erforderlich, die die Kompatibilität der diversen Technologien miteinander sicherstellen und zügig erarbeitet werden sollten. **Iterative Verfahren** können bei der Ausgestaltung der **Regulatorik** als Vorgehensweise berücksichtigt werden, um der dynamischen technologischen Entwicklung Rechnung zu tragen und gleichzeitig Investitionssicherheit zu gewährleisten.

Der geschätzte Investitionsaufwand für den Aufbau der Infrastruktur für Magnetfusion, Laserfusion sowie Materialien und Brennstoff bewegt sich im **mehrstelligen Milliardenbereich**; dabei sind internationale Kooperationen gegebenenfalls unumgänglich. Der Ansatz für die Finanzierung und Strukturierung im Rahmen der **IPCEI-Förderungen** könnte hier eine Orientierung bieten, denn ähnlich wie bei den IPCEI-Programmen ist auch in diesem Fall eine großvolumige Förderung von strategischem Interesse für Deutschland. Eine diesbezügliche Entscheidung sollte bereits in der derzeitigen Legislaturperiode fallen, die gezielten Förderungen für Entwicklungen (beispielsweise zu Lasertechnologie und Magneten) werden dann für die nächste Legislaturperiode relevant. Dies unterstreicht die Tatsache, dass Fusionsenergie als Zukunftstechnologie eine legislaturübergreifende Perspektive benötigt.

Der konsequente **Aufbau von Forschungsinfrastrukturen** stellt einen strategischen Hebel zur Entwicklung sowie zur Ausbildung der notwendigen **Fachkräftebasis** dar. Die **Beteiligung von Großunternehmen und Industrieakteuren** in diesen frühen Entwicklungsstadien wird von hohen Risiken und unsicheren Absatzmärkten gebremst; aufgrund der **zeitlich entfernten Erträge** ist ohne Anpassung von Förderquote und Anreizen keine hohe Beteiligung der Industrie zu erwarten. Bei der konkreten Umsetzung der Entwicklungsschritte hin zum Fusionskraftwerk droht allerdings die **Abwanderung** von zuvor mit öffentlichen Mitteln aufgebauten Kompetenzen, Technologien und Strukturen. Dies lässt sich durch einen klar definierten Rahmen vermeiden, der **Verantwortlichkeiten und Maßnahmen zur Technologiesicherung** klar regelt.

Weichen für die Technologie der Zukunft jetzt stellen

Deutschland hat mit seinen führenden Forschungsinstituten, den dynamischen Fusionsunternehmen und einer leistungsfähigen Industrie eine hervorragende Ausgangsposition. Die vorliegende **Roadmap** hat technologische Entwicklungspfade aufgezeigt und Handlungsoptionen abgeleitet. Diese liefern den Rahmen, um Weichen zu stellen und damit politische Entscheidungen mit großen Hebelwirkungen zu treffen. Folgende Kernbotschaften sind für Deutschlands Weg zu einem funktionstüchtigen Fusionskraftwerk wesentlich:

1) **Deutschland als Vorreiter der Fusionsenergie**

Deutschland hat mit führenden Forschungsinstituten, dynamischen Fusionsunternehmen und einer leistungsfähigen Industrie eine sehr gute Ausgangsbasis für erfolgreiche Innovationen in der Fusionsenergie mit hohem wirtschaftlichem Potenzial. Außerdem verfügt Deutschland über ein starkes akademisches Ökosystem aus Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen, das die Ausbildung hochqualifizierter Fachkräfte sowie die wissenschaftlichen Grundlagen der Fusionsenergie sichert. Wissenschaftlich betrachtet gibt es keinen Grund, warum die Fusion nicht gelingen sollte. Allerdings müssen zahlreiche technologische Herausforderungen bewältigt werden.

2) **Der Bau eines funktionstüchtigen Fusionskraftwerks in Deutschland verlangt allen Akteuren im Fusionsökosystem große Kraftanstrengungen ab**

Deutschland befindet sich derzeit noch in einer sehr guten Ausgangslage. Um diese gezielt zu nutzen, bedarf es einer massiven Beschleunigung bei der Umsetzung der erforderlichen Maßnahmen, um das Vorhaben, bis 2045 ein funktionstüchtiges Fusionskraftwerk in Betrieb zu nehmen, zu realisieren. Jeder Entwicklungspfad mit dem Ziel, ein Fusionskraftwerk zu errichten, erfordert die Bewältigung großer technologischer Herausforderungen und birgt unterschiedliche hohe Risiken sowie Chancen für den Standort. Die schnelle Realisierung eines ersten Fusionskraftwerks macht einen zusätzlich gesteigerten Ressourceneinsatz sowie ein besonders wirksames Management des Umsetzungsrisikos notwendig.

3) **„No-regret“-Optionen auf dem Weg zu einem ersten Fusionskraftwerk umsetzen**

Es ergeben sich drei klar erkennbare technologische Ansätze: (1) Aufbau der Infrastrukturen für fusionsspezifische Neutronentestung und des Brennstoffkreislaufs; (2) Priorisierung des Stellarators als Kraftwerkstechnologie für die Magnetfusion; (3) entschlossene Entwicklung der Lasertechnologie. Diese Ansätze sind mit einem klaren Bekenntnis zur langfristigen Förderung der Fusionsenergie zu realisieren.

4) **Strategie zur Umsetzung der Entwicklungsschritte zum Fusionskraftwerk festlegen**

Es können wiederum drei Szenarien entlang der Entwicklungsdynamiken abgeleitet werden: Ein erstes Szenario geht von einem hohen Ressourceneinsatz bei gleichzeitig hohem Risiko mit hohem Zeitgewinn für die Umsetzung aus. Ein zweites Umsetzungsszenario senkt das Risiko, kann den Ressourceneinsatz reduzieren, ist aber mit einer deutlichen Verlangsamung der Entwicklung verbunden. Ein drittes Szenario schließlich beschreibt ein ausgeglichenes Verhältnis von Ressourceneinsatz, Risiko sowie Geschwindigkeit und priorisiert den Aufbau eines ausgewogenen Ökosystems durch eine Mischung aus kooperativen vorwettbewerblichen Basisinfrastrukturen und wettbewerblichen Entwicklungen. Entlang der gewählten Szenarien ist eine deutliche Beschleunigung der Entwicklungsschritte möglich, sofern substanzielle zusätzliche Ressourcen bereitgestellt und das einzugehende Risiko abgewogen werden. Öffentliche Mittel sind jedoch begrenzt.

5) **Systemintegration kontinuierlich berücksichtigen**

Für eine zielführende Entwicklung zum Fusionskraftwerk ist neben der wissensgeleiteten Konzeption die Berücksichtigung der Systemintegration von Beginn an entscheidend. Zwischenziele werden dabei vom Kraftwerk aus rückwärts geplant. Ein Regulierungsrahmen und die Festlegung des Betreibermodells sind wichtige Leitplanken für ein zielgerichtetes Vorgehen.

Deutschland weist als Fusionsstandort großes Potenzial auf, die **Technologieführerschaft in zentralen Bereichen zu erreichen**. Entscheidend dafür sind internationale Partnerschaften, umfangreiche, aber gezielte

Investitionen und ein koordiniertes Zusammenspiel zwischen Forschung, Fusionsunternehmen und Industrie. **Die verfügbaren Ressourcen und der Umgang mit Risiken werden dabei die Entwicklungsdynamik entscheidend prägen.** Die Entwicklung der Fusionsenergie ist noch mit vielen Unsicherheiten behaftet, weshalb eine tragfähige Strategie auf langfristige Ziele setzen, aber Raum für flexible Anpassungen lassen muss. Im Zuge der technologischen Weiterentwicklung muss die **Strategie bewertet und angepasst** werden, gleichwohl müssen die Leitlinien für alle Beteiligten von Anfang an klar sein. Anhand dieser Entscheidungen werden heute die Weichen für die Technologie der Zukunft gestellt.

Literaturverzeichnis

- BMBF (2023) *Positionspapier Fusionsforschung*. Verfügbar unter: https://www.bmfr.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/7/775804_Positionspapier_Fusionsforschung.pdf (Zugegriffen: 16. März 2026).
- BMBF (2024) „Förderprogramm Fusion 2040 - Forschung auf dem Weg zum Fusionskraftwerk“. Publications Office. Verfügbar unter: <https://data.europa.eu/doi/10.2833/35750> (Zugegriffen: 10. Juni 2025).
- BMBF (2025) *ReFus - Pilotvorhaben zur Regulatorik für Fusionsanlagen*. Verfügbar unter: <https://www.mpil.de/de/pub/forschung/nach-rechtsgebieten/oeffentliches-recht/refus-pilotvorhaben.cfm> (Zugegriffen: 13. Februar 2026).
- BMFTR (2025a) *Deutschland auf dem Weg zum Fusionskraftwerk – Aktionsplan der Bundesregierung*. Verfügbar unter: https://www.bmfr.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/7/1112618_Aktionsplan_Fusion.html (Zugegriffen: 16. März 2026).
- BMFTR (2025b) *Hightech Agenda Deutschland*. Verfügbar unter: https://www.bmfr.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/L/31881_Hightech_Agenda_Deutschland.pdf (Zugegriffen: 16. März 2026).
- Bottura, L. et al. (2025) „Magnet R&D for the Muon Collider -- European Strategy Input“. arXiv. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.21185>.
- CEA (2025) *Nuclear fusion: WEST beats the world record for plasma duration!*, CEA/English Portal. CEA. Verfügbar unter: <https://www.cea.fr/english/Pages/News/nuclear-fusion-west-beats-the-world-record-for-plasma-duration.aspx> (Zugegriffen: 26. November 2025).
- CFS (2025a) *HTS magnets*. Verfügbar unter: <https://cfs.energy/technology/hts-magnets> (Zugegriffen: 28. November 2025).
- CFS (2025b) *SPARC®: Proving commercial fusion energy is possible*. Verfügbar unter: <https://cfs.energy/technology/sparc> (Zugegriffen: 27. November 2025).
- Chinese Academy of Sciences (2025) *Chinese „Artificial Sun“ Sets Milestone Record towards Fusion Power Generation*. Verfügbar unter: https://english.cas.cn/head/202501/t20250121_899060.shtml (Zugegriffen: 27. November 2025).
- Clark, D.W.S. et al. (2025) „Breeder blanket and tritium fuel cycle feasibility of the Infinity Two Fusion Pilot Plant“, *Journal of Plasma Physics*, S. 1–48. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1017/S002237782500039X>.
- Department for Energy Security & Net Zero (2023) *Towards Fusion Energy 2023: The next stage of the UK's fusion energy strategy*. Verfügbar unter: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/65301b78d06662000d1b7d0f/towards-fusion-energy-strategy-2023-update.pdf> (Zugegriffen: 2. Juli 2025).
- Department of Energy (2015) „Technology Readiness Assessment Guide“.
- Department of Energy Office of Science (2023) „Inertial Fusion Energy: Report of the 2022 Fusion Energy Sciences Basic Research Needs Workshop“.

Department of Energy Office of Science (2025) *Fusion Science & Technology Roadmap (S&T)*. Washington, D.C., USA. Verfügbar unter: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2025-10/fusion-s%26t-roadmap-101625.pdf?>

Dering, C. et al. (2026) *Kernfusionsforschung verschiebt Schwerpunkt: kommerzielle Nischenprodukte statt Energieversprechen*. 8/2026. Verfügbar unter: https://doi.org/10.18723/diw_wb:2026-8-1.

EPRI (2022) „Program on Technology Innovation: 2022 Fusion Prototypic Neutron Source (FPNS) Performance Requirements Workshop Summary“.

EUROfusion (2018) *European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy*. München, Deutschland: EUROfusion. Verfügbar unter: https://euro-fusion.org/wp-content/uploads/2022/10/2018_Research_roadmap_long_version_01.pdf.

European XFEL (2024) *Tackling Some Inertial Fusion Energy Challenges at the European XFEL*.

F4E (2020) „Governance & Committees“, *Fusion for Energy*. Verfügbar unter: <https://fusionforenergy.europa.eu/governance-committees/> (Zugegriffen: 14. Januar 2026).

F4E (2025) „Europe and Japan upgrade JT-60SA with new components“, *Fusion for Energy*, 28 Januar. Verfügbar unter: <https://fusionforenergy.europa.eu/news/europe-japan-jt60sa-tokamak-upgrade/> (Zugegriffen: 14. Januar 2026).

F4E Fusion Observatory (2025) *Global Investment in the Private Fusion Sector*. Verfügbar unter: https://fusionforenergy.europa.eu/wp-content/uploads/2025/11/F4E_Observatory_2025_digital.pdf (Zugegriffen: 16. März 2026).

Faraday Factory (2023) *Homepage, Faraday Factory Japan*. Verfügbar unter: <https://www.faradaygroup.com/en> (Zugegriffen: 22. Januar 2026).

FAST Project (2024) *Home FAST Project*. Verfügbar unter: <https://www.fast-pj.com/en> (Zugegriffen: 4. März 2026).

Forschungszentrum Jülich (2024a) *DEMO*. Verfügbar unter: <https://www.fz-juelich.de/de/ifn/ifn-1/forschung/demo> (Zugegriffen: 27. November 2025).

Forschungszentrum Jülich (2024b) *ITER*. Verfügbar unter: <https://www.fz-juelich.de/de/ifn/ifn-1/forschung/iter> (Zugegriffen: 27. November 2025).

Forschungszentrum Jülich (2024c) *Materialien und Komponenten*. Verfügbar unter: <https://www.fz-juelich.de/de/ifn/ifn-1/forschung/materialien-und-komponenten> (Zugegriffen: 13. Januar 2026).

Fusion Industry Association (FIA) (2025) *The Global Fusion Industry in 2025*.

Galloway, C., Valys, A. und Sutter, D. (2026) „Commercialization of laser fusion energy“. XCimer Energy. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1063/5.0297357>.

Gauss Fusion (2025) *Gauss Fusion presents Europe's first full design for a commercial fusion power plant*. Press Release. Verfügbar unter: <https://gauss-fusion.com/#News> (Zugegriffen: 16. März 2026).

Gilbert, M.R. et al. (2013) „Neutron-induced dpa, transmutations, gas production, and helium embrittlement of fusion materials“, *Journal of Nuclear Materials*, 442(1–3), S. S755–S760. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.03.085>.

Grünwald, R. (2024) *Auf dem Weg zu einem möglichen Kernfusionskraftwerk*. Büro für Technikfolgen Abschätzung.

Häfner, C. et al. (2023) *Memorandum Laser Inertial Fusion Energy*. BMBF. Verfügbar unter: https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/DE/2023/230522-memorandum-laser-inertial-fusion-energy.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (Zugegriffen: 28. Mai 2025).

Hefei Institutes of Physical Science und The Chinese Academy of Sciences (2022) *CRAFT Completes Site Infrastructure Construction and On Wheel to Use*. Verfügbar unter: https://english.hf.cas.cn/nr/bth/202203/t20220328_303131.html (Zugegriffen: 4. März 2026).

Helander, P. et al. (2012) „Stellarator and tokamak plasmas: a comparison“, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 54(12), S. 124009. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1088/0741-3335/54/12/124009>.

Hernández, F.A. et al. (2026) *Summary of the Discussions on the ‚Breeding Blanket Qualification Strategy‘ in the German DEMO Working Group*. IPP 2026-01. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.17617/2.3689302>.

Hessen Innovativ (2025) *Hessen treibt Fusionsenergie voran: Neuer FusionsCampus Biblis gestartet, IHK Hessen innovativ GbR*. Verfügbar unter: <https://www.ihk-hessen-innovativ.de/magazin/hessen-treibt-fusionsenergie-voran-neuer-fusionscampus-biblis-gestartet> (Zugegriffen: 9. Dezember 2025).

IEEE (1998) „IEEE Guide for Information Technology - System Definition - Concept of Operations (ConOps) Document“, *IEEE Std 1362-1998*, S. 1–24. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1998.89424>.

IFMIF-DONES (2025) „DONES Programme“, *IFMIF-DONES*, 14 Juni. Verfügbar unter: <https://ifmif-dones.es/dones-programme/> (Zugegriffen: 28. November 2025).

International Atomic Energy Agency (2025a) *Fusion Facility Database*. Verfügbar unter: <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal> (Zugegriffen: 5. Dezember 2025).

International Atomic Energy Agency (2025b) *IAEA World Fusion Outlook 2025*. IAEA. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.61092/iaea.agh6-zpih>.

ITER Organization (2023a) *ITER in France, ITER - the way to new energy*. Verfügbar unter: <https://www.iter.org/about/iter-france> (Zugegriffen: 26. November 2025).

ITER Organization (2023b) *Magnets, ITER - the way to new energy*. Verfügbar unter: <https://www.iter.org/machine/magnets> (Zugegriffen: 12. Dezember 2025).

Karlsruher Institut für Technologie (2025) *KIT - Das KIT - Medien - News - Themenhighlights - Kernfusion: Im Maschinenraum für das Sonnenfeuer*. Karlsruher Institut fuer Technologie. Verfügbar unter: <https://www.kit.edu/kit/kernfusion-im-maschinenraum-fuer-das-sonnenfeuer.php> (Zugegriffen: 27. November 2025).

Kikuchi, M. (2010) „A Review of Fusion and Tokamak Research Towards Steady-State Operation: A JAEA Contribution“, *Energies*, 3(11), S. 1741–1789. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3390/en3111741>.

Kyoto Fusioneering (2025) „Fusion Fuel Cycles (FFC), a Joint Venture between Kyoto Fusioneering and Canadian Nuclear Laboratories, Begins Construction of UNITY-2 Tritium Fuel Cycle Facility | NEWS“. Verfügbar unter: <https://kyotofusioneering.com/en/news/2025/11/07/3556> (Zugegriffen: 24. Februar 2026).

Kyoto Fusioneering (2026) „U.S. Department of Energy and Kyoto Fusioneering Launch Strategic

Partnership to Build Critical Fusion Infrastructure and Accelerate Deployment of Commercial Fusion Power | NEWS“, 29 Januar. Verfügbar unter: <https://kyotofusioneering.com/en/news/2026/01/29/3687> (Zugegriffen: 6. März 2026).

Lawrence Berkeley National Laboratory (2025) *About Us – U.S. Magnet Development Program*. Verfügbar unter: <https://usmdp.lbl.gov/about-us/> (Zugegriffen: 16. Dezember 2025).

Lawrence Livermore National Laboratory (2025) *NIF Sets Power and Energy Records*. Verfügbar unter: <https://lasers.llnl.gov/about/keys-to-success/nif-sets-power-energy-records> (Zugegriffen: 12. Januar 2026).

Leemans, W. et al. (2023) *The Fusion Energy Options - Discussion paper of the Helmholtz Task Force „Laserbasierte Fusionsforschung“*. Helmholtz. Verfügbar unter: https://www.helmholtz.de/assets/helmholtz_gemeinschaft/Standpunkte/Discussion_Paper_AG_Laser.pdf (Zugegriffen: 20. Oktober 2025).

Lion, J. et al. (2025) „Stellaris: A high-field quasi-isodynamic stellarator for a prototypical fusion power plant“, *Fusion Engineering and Design*, 214, S. 114868. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2025.114868>.

Marvel Fusion (2025) *Marvel Fusion -The ultimate clean energy solution*, Marvel Fusion. Verfügbar unter: <https://www.marvelfusion.io/> (Zugegriffen: 9. Dezember 2025).

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (2014a) *Divertor, IPP Glossar: Divertor*. Verfügbar unter: <https://www.ipp.mpg.de/83087/divertor> (Zugegriffen: 30. Januar 2026).

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (2014b) *Tritium*. Verfügbar unter: <https://www.ipp.mpg.de/84503/tritium> (Zugegriffen: 3. Februar 2026).

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (2024a) *Industriekooperationen*. Garching bei München: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik.

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (2024b) „Kernfusion Stand & Perspektiven“. Verfügbar unter: https://www.ipp.mpg.de/46293/fusionbasics_de.pdf (Zugegriffen: 28. November 2025).

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (2025a) *IPP Develops Superconducting Coil Models for Future Fusion Power Plants*. Verfügbar unter: <https://www.ipp.mpg.de/5548072/hts4fusion> (Zugegriffen: 10. Februar 2026).

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (2025b) *IPP entwickelt supraleitende Spulenmodelle für künftige Fusionskraftwerke*. Verfügbar unter: <https://www.ipp.mpg.de/5547867/hts4fusion> (Zugegriffen: 28. November 2025).

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (2025c) *Wendelstein 7-X sets new performance records in fusion research [UPDATE]*. Verfügbar unter: <https://www.ipp.mpg.de/5532945/w7x> (Zugegriffen: 16. Dezember 2025).

Münchener Stadtwerke (2025) *Hochspannungssupraleiter im Testbetrieb: Interview zum Forschungsprojekt „SuperLink“*. Verfügbar unter: <https://www.swm.de/unternehmen/magazin/innovation/interview-supraleiter-testbetrieb> (Zugegriffen: 13. Januar 2026).

Peres, A. (1979) „Fusion cross sections and thermonuclear reaction rates“, *J. Appl. Phys.; (United States)*, 50:9. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1063/1.326748>.

Proxima Fusion (2025) *Proxima Fusion | Building stellarators to power the future*. Verfügbar unter: <https://www.proximafusion.com/> (Zugegriffen: 28. November 2025).

Proxima Fusion (2026) *Proxima Fusion, RWE, the Free State of Bavaria and Max Planck Institute for Plasma Physics sign agreement to build the world's first commercial fusion power plant in Europe*. Verfügbar unter: <https://www.proximafusion.com/press-news/proxima-fusion-rwe-the-free-state-of-bavaria-and-max-planck-institute-for-plasma-physics-sign-agreement-to-build-the-worlds-first-commercial-fusion-power-plant-in-europe> (Zugegriffen: 5. März 2026).

Rapisarda, D. et al. (2025) „Breeding blanket mock-up testing in IFMIF-DONES“, *Nuclear Fusion*, 65(11), S. 116002. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ae0657>.

Richardson, M. et al. (2021) „Technology readiness assessment of materials for DEMO in-vessel applications“, *Journal of Nuclear Materials*, 550, S. 152906. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.152906>.

Schweitzer, J. (2024) „Der Tokamak ASDEX Upgrade und seine Rolle in der internationalen Fusionsforschung – Energie für die Menschheit aus Kernfusion“, *Technik in Bayern* [Preprint], (SEP/OKT 2024). Verfügbar unter: <https://www.technik-in-bayern.de/vorlage-graue-boxen-fuer-verlinkung-der-beitraege-3/der-tokamak-asdex-upgrade> (Zugegriffen: 27. November 2025).

Takeda, S. und Pearson, R. (2018) *Nuclear Fusion Power Plants*. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.5772/intechopen.80241>.

The Integrated Innovation Strategy Promotion Council (2023) „Fusion Energy Innovation Strategy (Provisional Translation)“. Verfügbar unter: https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/230426_strategy.pdf (Zugegriffen: 13. Juni 2025).

Ueda, Y. et al. (2017) „Baseline high heat flux and plasma facing materials for fusion“, *Nuclear Fusion* [Preprint]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6b60>.

U.K. Atomic Energy Authority (2025a) *UK Fusion Materials Roadmap 2.0*. Verfügbar unter: <https://www.ukaea.org/wp-content/uploads/2025/09/uk-materials-roadmap-2-0.pdf> (Zugegriffen: 20. November 2025).

U.K. Atomic Energy Authority (2025b) *UKAEA and Eni partner to develop tritium fuel cycle facility*, GOV.UK. Verfügbar unter: <https://www.gov.uk/government/news/ukaea-and-eni-partner-to-develop-tritium-fuel-cycle-facility> (Zugegriffen: 28. November 2025).

U.K. Atomic Energy Authority (2025c) „UKAEA-Eni H3AT Tritium Loop Facility“. Verfügbar unter: <https://www.ukaea.org/work/ukaea-eni-h3at-tritium-loop-facility/> (Zugegriffen: 6. März 2026).

U.K. Atomic Energy Authority (2026) „LIBRTI: The Lithium Breeding Tritium Innovation Programme“, 23 Februar. Verfügbar unter: <https://www.ukaea.org/work/librti/> (Zugegriffen: 6. März 2026).

University of Rochester (2025) „Omega Laser Facility“, *Laboratory for Laser Energetics*. Verfügbar unter: <https://www.lle.rochester.edu/omega-laser-facility/> (Zugegriffen: 27. Januar 2026).

Vaglio, R. und Calatroni, S. (2019) „Advances in the study of HTS superconductors for the beam impedance mitigation in CERN-FCC: the thermal runaway problem“, *The European Physical Journal Special Topics*, 228(3), S. 749–754. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1140/epjst/e2019-800180-9>.

VDI Bayern (2024) „Fusionsreaktoren“, *Technik in Bayern* [Preprint].

Von Müller, A. und Zohm, H. (2023) „Technology Readiness Level Assessment of Magnetic Confinement Fusion Based on the Tokamak Principle“. *30th IAEA Fusion Energy Conference*, London.

Wimmers, A. et al. (2025) „Kommerzielle Energieerzeugung mit Kernfusion nicht absehbar – Anwendungsforschung entwickelt sich dynamisch“, *DIW Wochenbericht*, 92. Verfügbar unter: https://doi.org/10.18723/DIW_WB:2025-13-1.

Wolf, R.C. et al. (2010) „From Wendelstein 7-X to a Stellarator Reactor“, *Plasma and Fusion Research*, 5, S. S1011–S1011. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1585/pfr.5.S1011>.

Wurbs, S. et al. (2024) *Kernfusion als Baustein einer klimaneutralen Energieversorgung? Chancen, Herausforderungen, Zeithorizonte*. Halle (Saale), Deutschland: acatech. Verfügbar unter: <https://www.leopoldina.org/publikationen/detailansicht/publication/kernfusion-als-baustein-einer-klimaneutralen-energieversorgung-chancen-herausforderungen-zeithorizonte-2024/>.

Yamada, H. (2025) „Nuclear Fusion“, *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation*. Springer, Cham, S. 2365–2410. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/978-3-031-84483-6_31.

Über acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

acatech berät Politik und Gesellschaft, unterstützt die innovationspolitische Willensbildung und vertritt die Technikwissenschaften international. Ihren von Bund und Ländern erteilten Beratungsauftrag erfüllt die Akademie unabhängig, wissenschaftsbasiert und gemeinwohlorientiert. acatech verdeutlicht Chancen und Risiken technologischer Entwicklungen und setzt sich dafür ein, dass aus Ideen Innovationen und aus Innovationen Wohlstand, Wohlfahrt und Lebensqualität erwachsen. acatech bringt Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Mitglieder der Akademie sind herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Ingenieur- und den Naturwissenschaften, der Medizin sowie aus den Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Senatorinnen und Senatoren sind Persönlichkeiten aus technologieorientierten Unternehmen und Vereinigungen sowie den großen Wissenschaftsorganisationen. Neben dem acatech FORUM in München als Hauptsitz unterhält acatech Büros in Berlin und Brüssel.

Weitere Informationen unter www.acatech.de.

Kontakt acatech Geschäftsstelle

acatech – DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN

Geschäftsstelle

Karolinenplatz 4
80333 München
T +49 (0)89 / 520 30 90

Hauptstadtbüro

Georgenstraße 25
10117 Berlin
T +49 (0)30 / 206 30 96 0

Brüssel-Büro

Rue d'Egmont/Egmontstraat 13
1000 Brüssel
Belgien
T +32 (0)2 / 213 81 80

info@acatech.de

www.acatech.de

<https://www.acatech.de/projekt/forschungs-und-innovationsroadmap-fusionsenergie-fire/>