

212

## Politikberatung kompakt

Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung

2026

# Kernfusion – technisch-wirtschaftliche Systemgutanalyse und Einordnung aktueller Trends in Industrie und Politik

Christian von Hirschhausen, Claudia Kemfert, Fanny Böse, Charlotte Dering, Johanna Krauß, Justus Krüger,  
Björn Steigerwald und Alexander Wimmers

## IMPRESSUM

DIW Berlin, 2026

DIW Berlin  
Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung  
Anton-Wilhelm-Amo-Straße 58  
10117 Berlin  
Tel. +49 (30) 897 89-0  
Fax +49 (30) 897 89-200  
[www.diw.de](http://www.diw.de)

ISBN 978-3-911978-03-3

ISSN 1614-6921

Alle Rechte vorbehalten.  
Abdruck oder vergleichbare  
Verwendung von Arbeiten  
des DIW Berlin ist auch in  
Auszügen nur mit vorheriger  
schriftlicher Genehmigung  
gestattet.



## **DIW Berlin: Politikberatung kompakt 212**

Christian von Hirschhausen<sup>1,2</sup>

Claudia Kemfert<sup>1,3</sup>

Fanny Böse<sup>2</sup>

Charlotte Dering<sup>2</sup>

Johanna Krauß<sup>2</sup>

Justus Krüger<sup>2</sup>

Björn Steigerwald<sup>2</sup>

Alexander Wimmers<sup>1,2</sup>

### **Kernfusion – technisch-wirtschaftliche Systemgutanalyse und Einordnung aktueller Trends in Industrie und Politik**

Hintergrundbericht zum Monitoring von  
forschungs- und innovationspolitischen Initiativen

Berlin, 31. März 2026

1 DIW Berlin, Abteilung Energie, Verkehr und Umwelt (EVU), Anton-Wilhelm-Amo-Str. 58, 10117 Berlin

2 TU Berlin, Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik (WIP), Str. des 17. Juni 135, 10623 Berlin

3 Leuphana Universität Lüneburg, Energiewirtschaft und Energiepolitik, Universitätsallee 1, 21335 Lüneburg



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Von Atomkernen zur Entsorgung: Eine nicht-technische Einführung</b>	<b>3</b>
2.1	Kernfusion im engeren Sinne	3
2.1.1	Kernfusion und -spaltung	3
2.1.2	Fusionselemente	5
2.1.3	Technologische Benchmarks der Kernfusion	6
2.2	Technologielinien und Reaktorkonzepte	7
2.2.1	Magneteinschluss	8
2.2.2	Trägheitseinschluss	12
2.2.3	Andere Technologien	14
2.3	Kernfusion als Systemgut mit Front-end und Back-end	16
2.3.1	Systemgut Kernfusion	16
2.3.2	Front-end: Fusionskerne und Brennstoffherstellung	17
2.3.3	Back-end: Rückbau und Entsorgung radioaktiver Abfälle	18
2.3.4	Proliferationsgefahren bei der Kernfusion	19
<b>3</b>	<b>Zwischenbilanz nach 75 Jahren</b>	<b>21</b>
3.1	Wissenschaftliche Fortschritte	21
3.1.1	Es ist etwas passiert	21
3.1.2	...und Fortschritte beim Tripel-Produkt	22
3.2	Offene Fragen (1): Technische Umsetzung	23
3.2.1	Brennstoffe für Kernfusion	23
3.2.2	Reaktormaterialien	24
3.2.3	Balance of Plant: Energieabführung	24
3.3	Offene Fragen (2): Wirtschaftlichkeit	25
3.3.1	Zeitskalen und Betrachtungsperspektiven	26
3.3.2	Betriebswirtschaftliche Betrachtung	27
3.3.3	Energiewirtschaftliche Betrachtung	32
3.3.4	Gesamtwirtschaftliche Betrachtung	34
3.4	Ausdruck unerfüllter Erwartungen: Die „Fusionskonstante“	37
3.4.1	Die „Fusionskonstante“ von mehreren Jahrzehnten	37

3.4.2 Die „Fusionskonstante“ in unterschiedlichen Perioden.....	38
3.4.3 Die „Fusionskonstante“ in Datenpunkten.....	41
<b>4 Neue Dynamiken: Öffentliche Großforschung und privatwirtschaftliche New Ventures .....</b>	<b>43</b>
4.1 Governance-Strukturen im Wandel: „Big Science“ und „New Ventures“.....	43
4.1.1 Großforschungseinrichtungen mit öffentlicher Finanzierung („Big Science“) ... ..	43
4.1.2 ...und privat kofinanzierte kommerzielle Unternehmen („New Ventures“).....	47
4.2 Fallstudien: Öffentliche Großforschung und New Ventures in unterschiedlichen Technologielinien.....	51
4.2.1 Tokamak .....	51
4.2.2 Stellerator .....	53
4.2.3 Trägheitseinschluss.....	55
4.2.4 Field-Reversed Configuration (FRC).....	57
4.2.5 Einordnung der Fallstudien .....	58
<b>5 Fazit: Notwendigkeit eines unabhängigen Kernfusions-Monitorings.....</b>	<b>61</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>62</b>

## Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Kernbindungsenergie bei Kernspaltung und Kernfusion.....	4
Abbildung 2: Eine mögliche Funktionsweise von Kernfusion auf der Erde: Deuterium-Tritium-Fusion .....	5
Abbildung 3: Technologielinien bei der Kernfusion und zugehörige Reaktorkonzepte .....	8
Abbildung 4: Schematische Darstellung einer Tokamak-Kammer und eines Magnetprofils.....	9
Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Stellarators.....	11
Abbildung 6: Trägheitsfusion: Direktantrieb (links) und Indirektantrieb (rechts) .....	13
Abbildung 7: Stilisiertes technisches System der Kernfusion .....	17
Abbildung 8: Entwicklung des Lawson'schen Tripel-Produkts für ausgewählte Reaktoren seit den 1950er Jahren.....	23
Abbildung 9: Beispiel für eine hypothetische Kostenschätzung (LCOE) eines zukünftigen Kernfusionskraftwerks .....	29
Abbildung 10: Baukosten („overnight construction cost“) Werte normiert nach USD <sub>2019</sub> pro kW für diverse Kernfusionskonzepte in diversen Publikationen von 1980 bis 2023.....	30
Abbildung 11: Analyse der Stromgestehungskosten (LCOE) .....	31
Abbildung 12: Forschungsaufwendungen für Atomenergie im Verhältnis zu anderen .....	36
Abbildung 13: Die Substitutionsdynamik der Primärenergieträger und die Verbreitung der Kernfusion ab 2025 nach Marchetti.....	40
Abbildung 14: Erwartungen an die Durchsetzung der Kernfusion in den kommenden Jahrzehnten („Fusionskonstante“) .....	42
Abbildung 15: Anstieg an Finanzierung für private Ventures .....	48
Abbildung 16: Überblick über Art und Struktur der bekannten Fusionsanlagen .....	49

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Typische Kernfusionsreaktionen, Produkte und Energiefreisetzung .....	6
Tabelle 2: Wirtschaftlichkeitsanalysen: Zeitskalen und Betrachterperspektiven bei der Kernfusion.....	27
Tabelle 3: Charakteristika und technische Parameter von je vier öffentlichen und privaten Kernfusions-Unternehmen.....	60



## 1 Einleitung

Angesichts der nicht nur in Deutschland und Europa, sondern auch global zu beobachtenden Renaissance“ von Vorstellungen der Kernfusion auf der Erde ist das Thema wieder auf allen Ebenen präsent, in Wissenschaft, Industrie, Politik und im öffentlichen Diskurs. Tatsächlich scheint die Kernfusion derzeit wieder Oberwasser zu gewinnen, nicht nur in den USA und in anderen Ländern Europas, sondern auch in Deutschland. Geht es nach der 2025 gewählten Bundesregierung, so soll der „erste Fusionsreaktor der Welt in Deutschland stehen.“<sup>1</sup> Auch global werden der Kernfusion große Perspektiven nachgesagt, u.a. in den USA und China sowie seitens der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO, oftmals als International Atomic Energy Agency (IAEA) zitiert), z.B. (IAEA, 2023). Diese Euphorie ist jedoch kein singuläres aktuelles Phänomen, sondern lässt sich seit den 1950er Jahren systematisch beobachten. Hat sich doch an dem eisernen Gesetz der Kernfusion, sie sei „in einigen Jahrzehnten kommerziell nutzbar“ (Radkau, 1983, S. 67 ff.; Spitzer et al., 2025) nichts geändert, man spricht inzwischen von der Fusionskonstante (Takeda et al., 2023; Buschner et al., 2026).

Tatsächlich gibt es trotz der jüngsten Entwicklungen erhebliche Unsicherheiten. So ist nach wie vor unklar, mit welchem Brennstoff welche Fusionstechnologie welchen Output erzeugen soll, und welche Schritte auf diesem Weg wie lange dauern könnten. Jedoch ist eine Dynamik im Sektor zu beobachten. Dabei weisen die aktuellen Entwicklungen, insbesondere die hohe Dynamik privat ko-finanzierter Forschung & Entwicklung, auf einen zunehmenden Konflikt in der strategischen Ausrichtung hin: Die Grundlagenforschung hat ihr vormaliges „Monopol“ auf auskömmliche Finanzierung zur Verfolgung des Traums der energetischen Nutzung der Kernfusion auf der Erde verloren und orientiert sich wieder in Richtung Grundlagen. So hat das vormalige Vorzeigeprojekt ITER auch 40 Jahre nach der Gründungsidee (1985) seine Experimente nicht aufnehmen können, die Rede ist nach zahlreichen Verschiebungen nunmehr von den späten 2030er Jahren. Andererseits fokussieren sich privatwirtschaftliche „New Ventures“ auf dem anwendungsorientierten F&E Markt, u.a. in den Bereichen Magnet- und Festkörperphysik und Laserforschung, wo sie beachtliche Fortschritte erzielen. Dabei bleibt die kommerzielle, gewinnträchtige Nutzung für die Energiegewinnung allerdings auch in diesen Ventures weiterhin nicht konkret absehbar.

Dieser Bericht beruht auf Forschung, Lehre und Outreach der Nachwuchsgruppe Atomkernenergie (AT-OM), welche in guter Zusammenarbeit zwischen der Technischen Universität Berlin (insb. dem Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik) und dem Deutschen Institut für

---

<sup>1</sup> Koalitionsvertrag für die vom 18. Bundestag 2025 gewählte CDU-SPD-Regierung (2025, Zeilen 2523-2525).

Wirtschaftsforschung (DIW Berlin, insb. der Abteilung Energie-Verkehr-Umwelt unter der Leitung von Professor Claudia Kemfert) betrieben wird. Er berücksichtigt insb. eigene Veröffentlichungen der Gruppe, u.a. Paper-Manuskripte (Böse et al., 2026; Buschner et al., 2026; Dering, 2026), zwei DIW Berlin Wochenberichte (Wimmers et al., 2025; Dering, Wimmers, Böse, et al., 2026) sowie einige Kapitel des von der Forschungsgruppe herausgegebenen Lehrbuchs „Nuclear Power“ (Wimmers, Böse, Kemfert, et al., 2026). Der Bericht vermittelt auch Hintergrundinformationen für öffentliche Diskussionen und Sachverständigenanhörungen, welche vom Team vorbereitet wurden, u.a. eine Paneldiskussion „Kernfusion: Hype oder Realität“ im DIW Berlin am 17. Februar 2026 sowie Stellungnahmen in Anhörungen im Landtag NRW (Ausschüsse für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie sowie Wissenschaftsausschuss, 24. Februar 2026) sowie im Bundestags-Ausschuss für Forschung, Technologie, Raumfahrt und Technikfolgenabschätzung (Fachgespräch "Kernfusion" in der Berichterstatterrunde Technikfolgenabschätzung, 20. März 2026, s. Anhang). Wir danken allen am Austausch Beteiligten sowie am DIW Berlin insbesondere Elisabeth Asche für die Übersicht bei Events und Veröffentlichungen und Lara Walter an der Schnittstelle Wissenschaft - Politik sowie an der TU Berlin Petra Haase für die Teamassistenz. Die Autor\*innen sind für die Inhalte verantwortlich.

## 2 Von Atomkernen zur Entsorgung: Eine nicht-technische Einführung

Ziel des Kapitels ist es, ein Grundwissen zu schaffen, sowohl zur Lektüre der folgenden Kapitel als auch, um an den rasch zunehmenden öffentlichen Diskursen teilnehmen zu können. International liegt mit (W. Nuttall u. a. 2025) eine umfassende Analyse des Universums Kernfusion vor. Darüber hinaus greift das Kapitel auch auf die Systembeschreibung von (Böhnlein et al., 2026) und (Wimmers, Böse, Kemfert, et al., 2026) zurück. Das Kapitel beginnt mit einer Betrachtung der Kernfusion im eigentlichen Sinne, d.h. der Verbindung leichter Atomkerne, die unter hohem Druck und Temperatur zu einem neuen Kern verschmelzen, wobei ein Neutron und eine große Menge an Energie frei werden. Im Anschluss daran wird das weitere technische System analysiert, d.h. unterschiedliche Reaktorkonzepte, innerhalb derer eine solche Kernfusion ablaufen könnte: Bekannt sind u.a. das Gemeinschaftsprojekt ITER, der deutsche Forschungsreaktor Wendelstein-7X oder das US Großforschungsinstitut National Ignition Facility (NIF) mit der Laserfusion. Die über 90 weltweit identifizierten Reaktorkonzepte lassen sich in wenigen Technologielinien zusammenfassen, insb. den Magneteinschluss und den Trägheitseinschluss, des Weiteren einige Mischformen. Last but not least benötigt jede Form der Kernfusion ein System von vor- und nachgelagerten Prozessen. Vorgelagert ist u.a. die Produktion der zu verschmelzenden Atomkernen, welche i.d.R. nicht natürlich verfügbar sind, wie z.B. Wasserstoff mit einem bzw. zwei Neutronen (genannt Deuterium und Tritium). Nachgelagerte Prozesse sind die Abfuhr der Wärme, die Sicherung radioaktiver Materialien vor illegaler Entnahme („Proliferation“) sowie der Rückbau der Reaktoren und die Zwischen- und Endlagerung radioaktiver Bauteile.

### 2.1 Kernfusion im engeren Sinne

#### 2.1.1 Kernfusion und -spaltung

Bei der Kernfusion verschmelzen zwei leichte Atomkerne unter großem Druck und bei hohen Temperaturen zu einem etwas schwereren Kern, wobei i.d.R. ein Neutron und eine große Menge an Energie frei werden. Wie grenzt sich Kernfusion von ihrer „großen Schwester“, der Kernspaltung, ab? Beiden ist gemeinsam, dass sie die starke Kraft innerhalb von Kernen nutzen, welche die Teilchen mit gleicher Ladung beieinander hält, obwohl sich die Protonen, d.h. die positiv geladenen Teilchen im Kern, ja voneinander abstoßen wollen. (Abbildung 1) gibt die Bindungsenergie in einem Kern (Y-Achse) in Abhängigkeit von der Anzahl der Nukleonen (X-Achse) an. Eisen-60 hat die höchste Energie und ist somit am stabilsten; sowohl schwerer Kerne (rechts von Eisen) als auch leichtere (links von Eisen) können jedoch durch Transformation der Kerne ihren Energiezustand verändern.

Der Unterschied zwischen Kernspaltung und -fusion ist, dass bei der Kernspaltung ein schwerer Kern, der viele Nukleonen (d.h. Protonen und Neutronen) beinhaltet, sich durch Neutronenbeschuss aufteilt bzw. zerfällt („Fission“), wobei leichtere Elemente entstehen (Abbildung 1):

~ So zerfällt in Kernkraftwerken das radioaktive Uran-235 (ganz rechts bei den Nukleonen, mit 92 Protonen) in Barium-144 (56 Protonen) und Krypton-89 (36 Protonen), wobei 3 Neutronen frei werden ( $144 + 89 + 3 = 235$ ) und Energie abgestrahlt wird. Der Zerfallsprozess erfolgt daher bzgl. der X-Achse „von rechts nach links“.

~ Im Gegensatz dazu verschmelzen bei der Kernfusion leichte Atomkerne zu schweren, sodass der Prozess „von links nach rechts“ erfolgt.

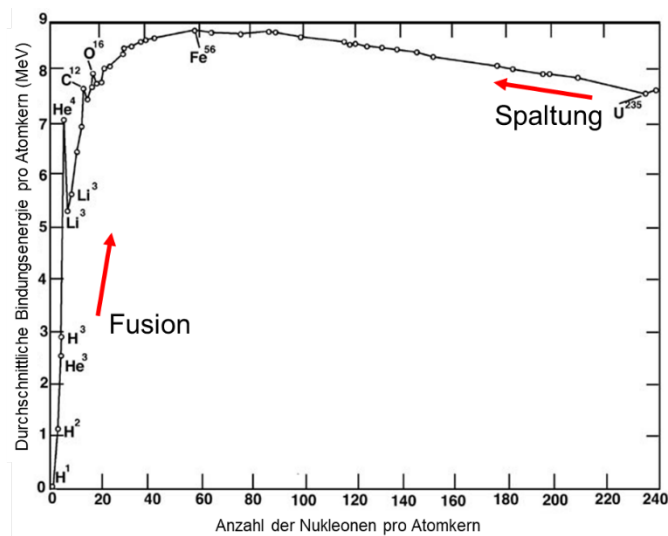


Abbildung 1: Kernbindungsenergie bei Kernspaltung und Kernfusion

Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf (Neles et al., 2012) .

In beiden Prozessen beruht die Freisetzung von Energie auf dem „Masseffekt“: Die Masse der Spaltprodukte bei der Kernspaltung (bzw. der Fusionsprodukte bei der Kernfusion) ist geringer als die Masse der Ausgangsprodukte. Die freigesetzte Energie lässt sich dann nach Albert Einsteins berühmter Formel ermitteln als

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

wobei  $\Delta E$  die freigesetzte Energie,  $\Delta m$  die Massendifferenz nach Kernspaltung (bzw. -fusion) ist und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit (ca. 298.000 km pro Sekunde) sind.

Abbildung 1 macht auch einen Effekt deutlich, der bei der Entwicklung der Kernfusionsbombe („Wasserstoffbombe“) entscheidend war: Die freigesetzte Energie pro Nukleon ist bei der Kernfusion um etwa eine Größenordnung höher als bei der Kernspaltung. Dies bedeutet, dass eine Wasserstoffbombe eine wesentlich stärkeren Zerstörungskraft entwickelt als eine Uran- bzw.

Kernspaltungsbombe. Diesen Effekt möchte man sich auch bei der Erforschung von Kernfusionskraftwerken zunutze machen.

### 2.1.2 Fusionselemente

Kernfusion muss mit sehr leichten Elementen erfolgen, um eine hohe Menge an Bindungsenergie freizusetzen. Daher wird i.d.R. Wasserstoff verwendet, das leichteste aller chemischen Elemente mit nur einem Proton. Die höchste Energiefreisetzung unter den derzeit für die technische Nutzung am intensivsten diskutierten Fusionsreaktion ergibt sich bei der Fusion der beiden Wasserstoffisotope Deuterium ( $^2\text{H}$ , ein Proton und ein Neutron) und Tritium ( $^3\text{H}$ , ein Proton und zwei Neutronen). Im Verlauf dieses Berichts wird die landläufige Bezeichnung „D-T-Fusion“ verwendet. Bei dieser Reaktion werden 17,6 Megaelektronenvolt (MeV) pro Fusionsreaktion freigesetzt.

Jedoch gibt es eine Vielzahl anderer Fusionskombinationen, die die geringere Energieausbeute durch andere potentielle Vorteile kompensieren könnten und dabei insbesondere die Nutzung des radioaktiven Tritiums vermeiden (Tabelle 1): Dazu gehört die Deuterium-Deuterium (D-D) Fusion, welche u.a. der neuen Unternehmung Tokamak Fusion und dem Wendelstein-Stellator eingesetzt wird. Ungewöhnlicher, weil technisch noch komplexer, sind die Verbindung von Deuterium und Helium-3, welche bei Helion Energy verwendet wird, oder die Proton-Boron-Mischung (P-B), welche bei der Trägheitsfusion Anwendung findet (z.B. vormals bei Marvel Fusion oder aktuell bei TAE (Tri Alpha Energy)).

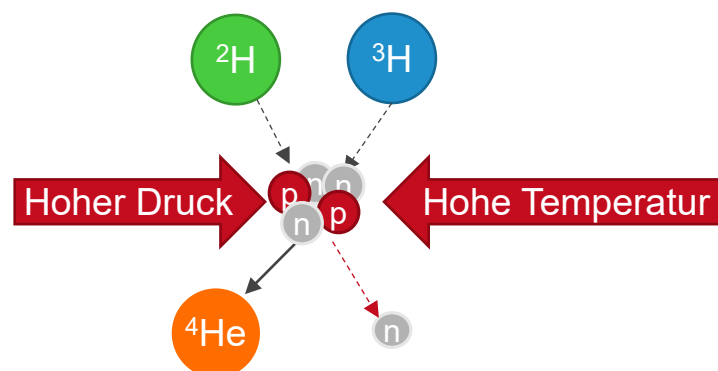


Abbildung 2: Eine mögliche Funktionsweise von Kernfusion auf der Erde: Deuterium-Tritium-Fusion  
Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 1: Typische Kernfusionsreaktionen, Produkte und Energiefreisetzung

Brennstoff	Produkt	Beispiel
D	${}^3\text{He}$ (0.8 MeV) + n (2.45 MeV)	W7-X; Tokamak Energy; IPA
	T (1.01 MeV) + p (3.02 MeV)	
D	${}^4\text{He}$ (3.5 MeV) + n (14.1 MeV)	JET, NIF, ITER, CFS
	${}^3\text{He}$	
p	${}^4\text{He}$ (3.6 MeV) + p (14.7 MeV)	Helion Energy Inc.
	${}^{11}\text{B}$	
p	$3 {}^4\text{He}$ + 8.7 MeV	TAE Tech. Ltd

Quelle: Eigene Zusammenstellung.

### 2.1.3 Technologische Benchmarks der Kernfusion

#### 2.1.3.1.1 Das Tripelprodukt und das Lawson-Kriterium

Damit die Deuterium- und Tritium-Ionen trotz ihrer gegenseitigen elektrostatischen Abstoßung verschmelzen, muss das Wasserstoffgemisch in einem Plasmazustand, in dem sich Elektronen und Wasserstoffionen frei bewegen können, eine bestimmte Zeit sehr hohen Temperaturen und Drücken ausgesetzt werden. Dazu braucht es geeignete physikalische Bedingungen, welche bis heute nur für sehr kurze Zeiten, in vereinzelt Experimenten, und ohne energetische Nutzung erreicht worden sind.

Auf John D. Lawson (1957) geht die Faustregel für die Magnet-Kernfusion zurück, welche die Entstehungsbedingung einer dauerhaften Kernfusion beschreibt, das sogenannte „Tripel-Produkt“ —  $n \cdot T \cdot \tau$  (wobei  $n$  die Plasmadichte,  $T$  die Temperatur und  $\tau$  die Energieeinschlusszeit ist). Für eine Aufrechterhaltung müssen alle drei Bedingungen so eingestellt werden, dass der Wärmeverlust durch die Fusionsenergie ausgeglichen wird. Das Fusionsprodukt (Triple-Product) gibt an, ab welchen Wert die erzeugte Wärme aus der Fusion ausreicht, um die Temperatur im Plasma aufrechtzuerhalten (Braams & Stott, 2002; W. J. Nuttall, 2005). Der kritische Wert für das Tripelprodukt ist  $6 \times 10^{21} \text{ keV s/m}^3$ .<sup>2</sup>

#### 2.1.3.1.2 Der Q Faktor

Der sogenannte Q-Faktor gibt es Verhältnis der Energiemengen an, welche aus einem Kernfusionsprozess herauskommen bzw. in diesen eingehen. Ein Faktor  $Q = 1$  sagt somit aus, dass die eingesetzte Energiemenge identisch der durch Fusion produzierten Energie ist. Somit muss bei der Kernfusion ein Q-Faktor größer als 1 erzielt werden, will man zusätzliche Energie gewinnen. In der Literatur kursieren unterschiedliche Varianten des Q-Faktors: Eine wichtige

<sup>2</sup> Darüber hinaus gibt es noch ein anderes Kriterium mit lediglich zwei Parametern, welches als einfaches Lawson-Kriterium bezeichnet wird: Plasmadichte  $n$  und Einschlusszeit  $\tau$ , also das Produkt  $n \cdot \tau$ .

Unterscheidung liegt zwischen dem natur- und dem ingenieurwissenschaftlichen Q-Faktor: Das naturwissenschaftliche Q, welches nur die Nettoenergiebilanz der Fusionsreaktion selbst berücksichtigt, nämlich das Verhältnis der erzeugten Energie zur in das Plasma eingespeisten Energie. Folglich schließt diese Definition Verluste aufgrund von Ineffizienzen in externen Energiesystemelementen wie Magneten oder Lasern aus, obwohl diese für die Bewertung der Machbarkeit von Fusionsenergie wichtig sind. Der ingenieurwissenschaftliche Q-Faktor berücksichtigt dies und ist somit für die energietechnische Bewertung relevant (Meschini et al., 2023).

Eine weitere in der Kernfusions-Community verwendete Faustregel beschreibt als  $Q > 5$  einen Prozess, der für eine ingenieurwissenschaftlich „nachhaltige“ Kernfusion spricht, d.h. es „lohnt“ sich insgesamt. Q Werte jenseits von 10 bzw. sogar 20 designieren demzufolge eine kommerzielle, d.h. wirtschaftlich rentabel Kernfusion (Meschini et al., 2023). Jedoch sind diese Daumenregeln bisher nicht empirisch überprüfbar gewesen, gibt es doch bisher keine Fusionsprozesse, die das eigentliche Lawson-Kriterium überhaupt erfüllen und eine dauerhafte Energieabgabe sichern.

#### **2.1.3.1.3 Der Mythos „Sonne auf die Erde holen“**

Kernfusion erfolgt an der Oberfläche der Sonne, als auch auf anderen Sternen, seit Milliarden von Jahren. Allerdings ist die oftmals bemühte Analoge der Kernfusion in der Sonne, die man „auf die Erde holen“ würde, falsch und zeichnet ein vereinfachendes, fehlleitendes Bild: So sind die Reaktionen auf der Sonne grundsätzlich andere, weil dort einfache Wasserstoffkerne verschmelzen und in einer nächsten Stufe Heliumkerne und Energie entsteht; dagegen bräuchte man auf der Erde Isotope von Wasserstoff, u.a. das radioaktive Tritium, welches in der Natur nicht vorkommt, zur Fusion. Zum Zweiten herrscht in der Sonne aufgrund der großen Masse ein Gravitationsdruck, der 250 Milliarden mal stärker ist als der auf der Erdoberfläche. Dadurch kommt es auf der Erde eben nur unter extrem hohen Temperaturen und Drücken zur Fusion, was in 75 Jahren intensiver Forschung nicht annähernd erreicht worden ist. Beispielsweise erfolgt Fusion auf der Sonne bei „nur“ 15 Millionen Grad Celsius, wohingegen auf der Erde i.d.R. Hunderte Millionen Grad Celsius benötigt werden, in besonders komplizierten Reaktionen sogar bis zu über einer Milliarde Grad! Drittens ist die Kernfusion auf der Sonne unkontrolliert, so wie auch in der Wasserstoffbombe, wohingegen in einem Kraftwerk die freigesetzte Energie aufgefangen und in andere Energieformen umgewandelt werden soll.

## **2.2 Technologielinien und Reaktorkonzepte**

Als Technologieline versteht man eine Gruppe von Anlagen mit ähnlichen physikalisch-chemischen Abläufen bei der Kernfusion. Dagegen ist ein Reaktorkonzept ein konkretes Modell eines konkreten Kernfusionsreaktors innerhalb einer Technologieline, der jedoch eine Vielzahl an

ingenieurtechnischen Spezifika aufweisen kann. Es gibt zwei wesentliche Technologielinien, welche sich im Wesentlichen darin unterscheiden wie das Plasma eingeschlossen wird und welcher Parameter maximiert wird: Den Magnet- und den Trägheitseinschluss. Dazwischen sind beliebige Mischformen vorstellbar (Abbildung 3).

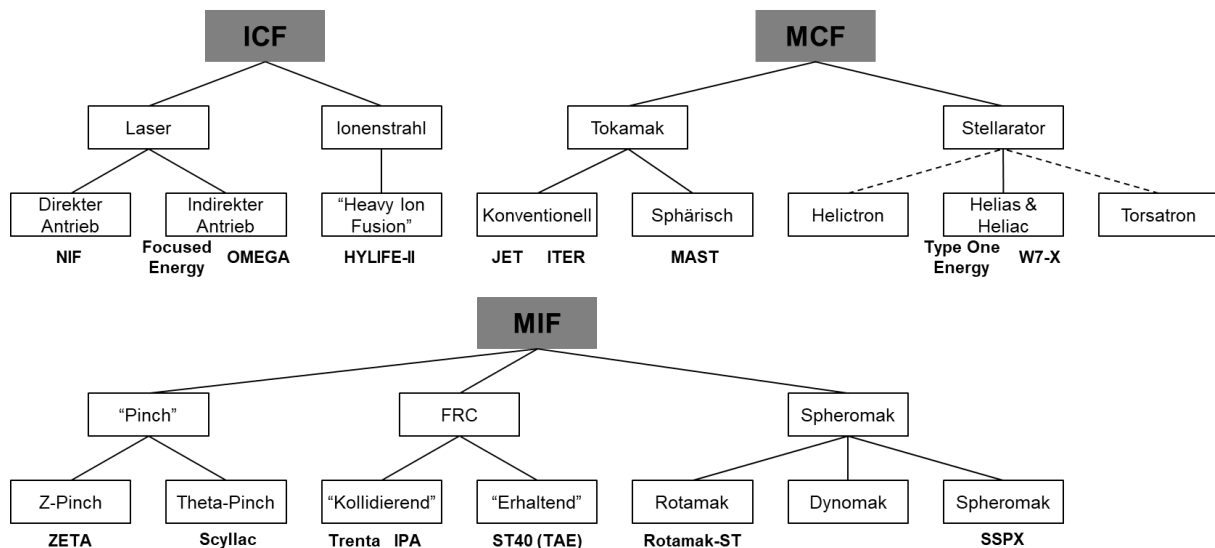


Abbildung 3: Technologielinien bei der Kernfusion und zugehörige Reaktorkonzepte

Quelle: Eigene Abbildung.

## 2.2.1 Magneteinschluss

Beim magnetischen Einschluss wird mit Hilfe von Magnetspulen ein heißes Plasma erzeugt, welches dazu führt, dass die Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium fusionieren. Daraus entsteht Helium und Neutronen mit hoher kinetischer Energie, die auf die Reaktorwand stoßen, Wärme erzeugen und dann zur Erzeugung von Wasserdampf und elektrischer Energie genutzt werden können. Magnetfusionskonzepte zielen auf die Maximierung der Einschlusszeit ab. Innerhalb des Magneteinschlusses gibt es zwei Technologielinien, die Tokamak- und die Stellarator-Familie. Während der Tokamak einen gepulsten Strom benötigt, um das Plasma zu erzeugen, ist der Stellarator durch eine spezielle Verwindung der Spulen darauf nicht angewiesen und kann deshalb im Dauerbetrieb laufen.

### 2.2.1.1 Tokamak

#### 2.2.1.1.1 Funktionsweise

Die Technologielinie des Tokamaks zeichnet sich durch ein mehrdimensionales Magnetfeld aus, innerhalb dessen auch das Plasma selber, in dem die Kernfusion stattfindet, als Elektroleiter genutzt wird. Der Begriff Tokamak stammt aus dem Russischen und bedeutet übersetzt „Toroidal-kammer mit Magnetspulen“ (russisch: torrodialne katschumy c magnetschikey kamera).

Vereinfacht handelt es sich um einen Donut, innerhalb dessen bei sehr hoher Temperatur ein Strom in einem Plasma („Ionen-Suppe“) fließt, innerhalb dessen wiederum die Kernfusion stattfindet. Die Umgebung ist mit dreidimensionalen Magnetstrukturen versehen, die das Plasma einschließen und gleichzeitig den Kontakt zur Außenwand (in der Abbildung nicht sichtbar) sicherstellen.

Wie alle Technologielinien muss der Tokamak extreme Bedingungen aushalten. Der Torus muss Temperaturen von Hunderten von Millionen von Grad Celsius aushalten, wofür seit langem Beryllium- und Wolfram-Metalle erprobt werden. Durch die Nutzung des Plasmas als Stromleiter erfolgt die Energieerzeugung in "Pulsen“, d.h. nach dem Versiegen eines Pulses muss die Anlage wieder geladen werden, wodurch eine Pause in der Energieerzeugung entsteht. Diese stellt für die kontinuierliche Stromerzeugung ein Problem dar. Die Abfuhr der Wärme aus dem Plasma ist bis heute ungelöst, wie auch die Erbrütung des geplanten Fusionselements Tritium.

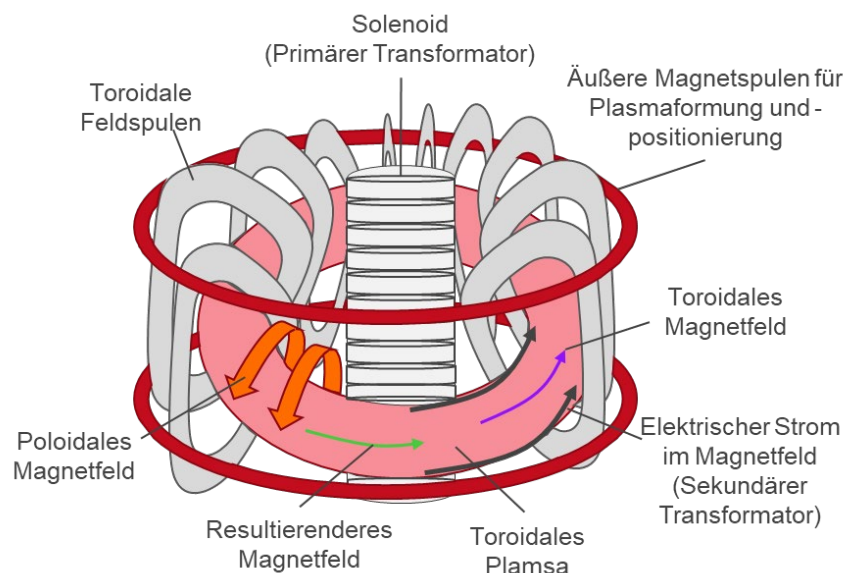


Abbildung 4: Schematische Darstellung einer Tokamak-Kammer und eines Magnetprofils

Quelle: (Wimmers, Böse, Kemfert, et al., 2026, S. 44), eigene Übersetzung.

#### 2.2.1.1.2 Reaktorkonzepte

Versuche, Magneteinschluss kommerziell zu nutzen, gehen bereits auf die frühen 1950er Jahre zurück. In einer Unterabteilung des auf die Wasserstoffbombe ausgerichteten Project Matterhorn entwickelte Lyman Spitzer am Princeton Institut for Plasma Physics bereits 1951 eine Urform des Stellarators. Parallel entwickelten in der Sowjetunion Physiker um Andrei Sakharov, Igor Tamm und Oleg Lavrentev das Prinzip des Tokamaks, welcher 1962 erstmals als Reaktor-konzept T-3 in Betrieb ging. Die von den Supermächten ermöglichte De-Klassifizierung vormals

geheimen technischen Wissens führte dann in den 1960/70er Jahren zu einer Vervielfältigung der Forschungsbemühungen, wobei der Tokamak mit Abstand führend war. Konkrete Reaktorkonzepte aus dieser Zeit beinhalten den Tokamak-Fusionsreaktor (TFR), der 1973 in Frankreich gebaut wurde; die in den USA ansässigen Anlagen Princeton Large Torus (PLT) und Tokamak Fusion Test Reactor TFTR, die 1975 bzw. 1982 in Princeton gebaut wurden, der Joint European Torus (JET), der 1983 in Großbritannien gebaut wurde, und schließlich der Japanese Torus JT-60, der 1985 in Betrieb genommen wurde.

Vorüberlegungen zur internationalen Kooperation beim Magneteinschluss gehen auf die 1970er Jahre zurück, u.a. auf den International Tokamak Orientation Research (INTOR)-Workshop 1978, an dem die USA, die Sowjetunion, Japan und die Europäische Gemeinschaft unter der Ägide der IAEA teilnahmen (Reinders, 2021, S. 242). Der Höhepunkt des Prozesses war die Einigung zwischen den USA und der Sowjetunion auf ein internationales Forschungs- und Entwicklungskonzept, den International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), welche im Jahr 1985 beim Genfer Gipfel zwischen US-Präsident Ronald Reagan und dem Generalsekretär der sowjetischen kommunistischen Partei, Michael Gorbatschow, abgeschlossen wurde: ITER stellt das bisher größte Tokamak-Konzept dar (Plasmavolumen von ca. 800 m<sup>3</sup>) und sollte Grundlagen-Forschungsergebnisse für die globale Kernfusions-Community bereitstellen. Allerdings hat der ITER niemals richtig Fahrt aufgenommen und ist in Bezug auf konkrete Forschungsschritte um Jahrzehnte verzögert. So wurden die ersten Experimente mit einer Deuterium-Tritium-Fusion vielfach verschoben, inzwischen im optimistischsten Fall auf das Ende der 2030er Jahre. Durch die permanenten Verzögerungen und dem sich anbahnenden Scheitern des ITER-Projekts hat die Stellerator-Technologielinie wieder Oberhand bekommen, z.B. in Deutschland durch das Reaktorkonzept Wendelstein-7X.

### **2.2.1.2 Stellerator**

#### **2.2.1.2.1 Funktionsweise**

Die Technologielinie der Stelleratoren (von Stella = lateinisch Stern) nutzt die externe Plasmaperdichtung durch besonders ausgerichtete Magnetspulen, um einen kontinuierlichen Plasmafluss zu erreichen und damit das Problem pulsierender Energieerzeugung beim Tokamak zu vermeiden. Dies erfordert eine für jede Ausprägung spezifische Auslegung der elektromagnetischen Spulen, welche um das Plasma angelegt werden müssen (Abbildung 5).

Trotz stark gesteigerter Rechenleistung ist das Design von Stelleratoren, insb. die Auslegung der Spulen, bisher „Handarbeit“ und muss fallspezifisch erfolgen. Stelleratoren fehlt dadurch auch die durch den Ohm'schen Widerstand im (Tokamak-)Plasma erlangte Hochtemperaturentwicklung, welche durch externe Mechanismen wie Mikrowellen bzw. Neutralstrahleinleitung

(neutral beam injection) ersetzt werden muss. Dafür ermöglicht der Stellarator, der 1951 als erster aller potenziellen Nutzungen entwickelt wurde, eine kontinuierliche Wärmeabgabe und ist somit eher für energetische Nutzungen geeignet.

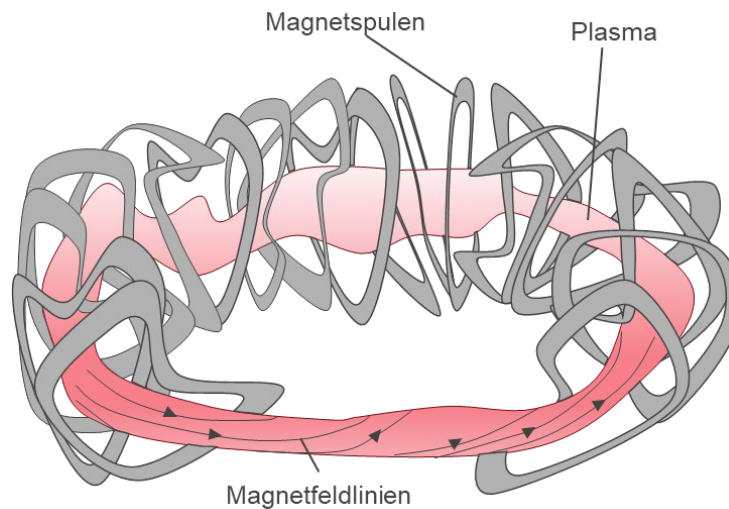


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Stellarators

Quelle: (Wimmers, Böse, Kemfert, et al., 2026, S. 46), eigene Übersetzung.

#### 2.2.1.2.2 Reaktorkonzepte

Die ersten Reaktorkonzepte für den Stellarator wurden 1951 vom Astrophysiker Lyman Spitzer in Princeton (USA) vorgeschlagen. Dabei handelte es sich um sogenannten „klassische Stellaratoren“ mit verdrilltem Torus mit der Figur der verdrehten 8. Spitzer und sein Team entwickelten in den 1950/60er Jahren die Modelle Princeton Model A, B und C sowie den ersten systematischen Reaktorentwurf (Model D, 1955). Darauf aufbauend wurden vor allem in den USA und Japan weitere Varianten wie der Torsatron (mit kontinuierlichen Helixspulen) und der Heliotron (mit helical- und toroidalen Spulen) entwickelt. Aufgrund der geringen Plasmaschlussleistung und des Durchmarsches des Tokamaks wurde die erste Generation von Stellarator-Reaktorkonzepten überwiegend zu den Akten gelegt.

Seit den 1970/80er Jahren wurde das Konzept jedoch vereinzelt fortgeführt bzw. auch neu aufgesetzt, z.B. in Deutschland mit der Familie der Wendelstein-Reaktoren (1 bis heute 7X). Moderne Konzepte wie der Helias (helical advanced stellarator) – zu dem auch der deutsche Wendelstein 7-X gehört – nutzen komplexe, dreidimensional geformte Spulen, um ein optimiertes Magnetfeld zu erzeugen, das den Energieverlust des Plasmas minimiert. Darüber hinaus gibt es noch quasi-toroidale und quasi-achsensymmetrische Stellarator, um bestimmte Symmetrien aus dem Tokamak-Design in das Stellaratorprinzip zu übertragen und die Teilchenbahnen zu verbessern. Die Qualität und Kosten beim Design und Bau dieser Spulen werden oftmals als zentral

für die Zukunft der Technologielinie betrachtet. Japan entwickelte die Heliotron-/Large Helical Device-Linie, Spanien den Heliac-Stellarator TJ-II und die USA das Helically Symmetric Experiment (HSX). Auch die Ukraine entwickelte mit Uragan-2M einen Torsatron-Stellarator.

Nach dem Scheitern des ITER-Tokamaks bringt die Forschungs-Community den Stellarator wieder ins Spiel. Das aktuell größte und technologisch fortschrittlichste Experiment ist Wendelstein 7-X in Greifswald (seit 2015), welches inzwischen einige Rekorde bzgl. des Tripelprodukts erzielt hat. Allerdings ist dieser, auch nach Aussage der IPP-Leitung, keine Grundlage für einen kommerziellen Betrieb. Unter den privatwirtschaftlichen Unternehmen, die auf den Stellarator setzen sticht TOE hervor, dessen Langfristziel der Bau eines Stellarator-Demonstrationsreaktors mit großem Volumen (386 m<sup>3</sup>) und Leistung (800 MW thermisch, für 350 MWel Strom) ist.

### **2.2.2 Trägheitseinschluss**

Bei der trägheitsbasierten Laserfusion wird mit Hilfe von hochenergetischen Lasern auf ein sehr kleines Brennstoffkugelchen (genannt Pellet) geschossen, welches sich innerhalb kürzester Zeit so stark erhitzt und ausdehnt, dass die Zeit, die die Masse zur Expansion braucht, ausreicht, um Atomkerne zu fusionieren. Beim Trägheitseinschluss wird somit die Trägheit des Plasmas für den Einschluss genutzt und die Dichte des Plasmas maximiert.

#### **2.2.2.1 Funktionsweise**

Beim Trägheitseinschluss handelt es sich um eine Technologielinie militärischer Wasserstoffbombenentwicklung; demzufolge ist bis heute die Nähe von kommerzieller und militärischer Forschung besonders groß. Bereits Anfang der 1940er Jahre wurden im Rahmen des Project Manhattan Forschungen zur Wasserstoffbombe durchgeführt, insb. von Edward Teller und Stanislaw Ulam.<sup>3</sup> Im ursprünglichen Teller-Ulam Design wurde diese Zündung durch eine Kernspaltungsbombe initiiert. Diese Forschung wurde nach 1945 an drei Haupt-Standorten weitergeführt (Los Alamos, Livermore, Princeton) und erhielt auskömmliche Finanzierung u.a. durch das US Department of Defense. Ende der 1960er Jahre wurden erstmals Laser-betriebene Konzepte experimentell erforscht, welche die bisher aus Bomben bekannte Zündung durch eine Kernspaltungs-Atombombe ersetzen sollte.

Lasergetriebene Trägheitsfusion kann entweder durch Direktantrieb oder Indirektantrieb realisiert werden (Abbildung 6):

~ Beim Direktantrieb bestrahlen mehrere Ultraviolett-Laserstrahlen das Fusionspellet direkt und symmetrisch und komprimieren es so unmittelbar.

---

<sup>3</sup> Vgl. (Wimmers, Böse, & Von Hirschhausen, 2026) sowie die dort zitierte Literatur.

~ Beim Indirektantrieb wird das Pellet in einen kleinen Zylinder, einen sogenannten „Hohlraum“, eingebracht, der in der Regel aus Materialien wie Gold oder Uran besteht. Bei diesem Ansatz erhitzen Laserstrahlen die Innenwände des Hohlraums und erzeugen heißes Plasma, das thermische Röntgenstrahlen aussendet. Diese Röntgenstrahlen werden dann von der Zieloberfläche absorbiert und verursachen eine Implosion, ähnlich wie bei der direkten Laserbestrahlung.

Obwohl die Röntgenstrahlenabsorption für das Fusionspellet selbst effizienter ist als die direkte Laserabsorption, wird ein erheblicher Teil der Eingangsleistung zur Erwärmung des Hohlraums verwendet, was die Gesamteffizienz des Prozesses verringert. Für beide Verfahren wird etwa 1 MJ-Eingangsleistung für die Fusionszündung benötigt (Badziak, 2012).

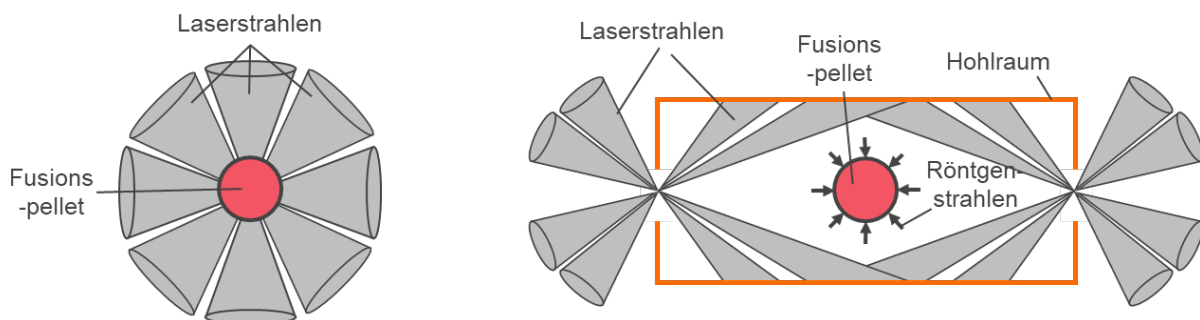


Abbildung 6: Trägheitsfusion: Direktantrieb (links) und Indirektantrieb (rechts)

Quelle: (Wimmers, Böse, & Von Hirschhausen, 2026, S. 47), eigene Übersetzung.

Sowohl direkte als auch indirekte Antriebsmethoden stehen vor ähnlichen Herausforderungen, darunter die Erzielung einer hohen Energieübertragungseffizienz vom Laser zum Brennstoff, die Kontrolle der Implosionssymmetrie, die Verhinderung einer Vorwärmung des Brennstoffs durch heiße Elektronen und Röntgenstrahlen, die Vermeidung einer vorzeitigen Vermischung von heißem und kaltem Brennstoff aufgrund hydrodynamischer Instabilitäten und die Sicherstellung der Bildung einer starken Schockwelle im Brennstoffzentrum (Badziak, 2012; Meier et al., 2014; Reinders, 2021). Um diese Herausforderungen zu bewältigen, ist neben einer äußerst präzisen Fertigung von Pellets auch kurzwellige Strahlung unerlässlich. Laser- oder Röntgenstrahlen müssen hochpräzise und synchronisiert sein, damit sie alle Punkte auf dem Pellet gleichzeitig erreichen. Darüber hinaus müssen die Pellets genau positioniert werden, damit sie von einem Laser mit einer Pulsfrequenz von mehreren Schüssen pro Sekunde getroffen werden können.

In den 1970/80er Jahren bestand die wesentliche Herausforderung in der Leistung der Laser für die Energieerzeugung der direkten bzw. indirekten Trägheitsfusion. Geheime Waffentests in Nevada belegten zwar grundsätzlich die Funktionsweise, wiesen jedoch einen Bedarf an wesentlich höheren Laserleistungen aus als ursprünglich angenommen. Ein weiterer Treiber war der Test Ban Treaty von 1992 und das Ende unterirdischer Kernwaffentests in den USA und der Sowjetunion. Im Rahmen des zum Wissens- und Abschreckungserhalts in den USA entwickelten „National Stewardship Program“ wurden die Forschungskapazitäten zur Trägheitsfusion weiter erheblich ausgebaut. Insbesondere in der Laserforschung. U.a. wurde am Standort Livermore die National Ignition Facility (NIF) zur Hochleistung-Laser-Experimentalfusion aufgebaut, welche seit 2022 regelmäßige Experimentalversuche bzgl. des indirect-drive Verfahrens produziert.

#### **2.2.2.2 Reaktorkonzepte**

Trägheitsfusion ist ein altes Thema, aber die Anzahl der Stellerator-Reaktorkonzepte zur kommerziellen Nutzung ist bis heute sehr überschaubar, und die Nutzung der Hitze im Blanket bzw. zur Energiegewinnung bis heute weitgehend unerforscht. Das bekannteste Design, die Hochleistungs-Laseranlage am NIF, spielt hierfür keine Rolle, handelt es sich doch lediglich um eine Testanlage für Laser-Waffensysteme, ohne kommerziellen Anspruch. Selbiges gilt auch für das französische Projekt, analog zu NIF, der Laser Mégajoule (LMJ).

Aktuell wird an mehreren Entwicklungen gearbeitet, u.a. das Zündschema und das Design eines späteren Laserfusionskraftwerks. Zündschemata sollen den Energiebedarf der Kompression reduzieren: Fast Ignition (separate Zündung mit einem ultrakurzen Hochleistungslaser nach der Kompression, vor allem in Japan erforscht) und Shock Ignition, bei dem ein zusätzlicher starker Laserpuls am Ende der Kompression eine Stoßwelle erzeugt und die Fusion auslöst. Für ein funktionierendes Inertial Fusion Energy (IFE) Kernfusionskraftwerk fehlen jedoch Konzepte zur Reaktionskammer, der Schnittstelle zum Rest des Kraftwerks sowie die Umwandlung der Energie (Haefner et al., 2023).

#### **2.2.3 Andere Technologien**

Neben der Magnet- und der Trägheitsfusion wurden und werden zahlreiche andere Konzepte erforscht (Barbarino, 2020). Dadurch steigt die Komplexität des Sektors und die Unmöglichkeit, eine „beste“ Technologie zu identifizieren, erheblich. Etwa 30% der geplanten oder in Betrieb befindlichen Reaktoren basieren auf alternativen Konzepten, darunter die Pinch-Methode, die Reverse-Pinch-Methode, die Feldumkehrkonfiguration (FRC) und die magnetische Trägheitsfusion (MIF) (Abbildung 3).

Die alternativen Konzepte werden insbesondere außerhalb öffentlicher Forschungseinrichtungen verwendet (Fusion Device Information System – FusDIS, 2021). Diese Reaktoren sind oft

weniger komplex, ermöglichen dadurch aber auch kleineren Forschungseinrichtungen eine gewichtige Beteiligung. Durch den Misserfolg des Magneteinschlusses, welcher seit Beginn der Kernfusions-Ära durch Großforschungseinrichtungen verfolgt wurde, ist das Pendel auch in Richtung alternativer Technologielinien und Reaktorkonzepte geschwungen, welche tendenziell die privatwirtschaftliche Beteiligung stärkt. So sind die zwei „lautesten“ privaten Ventures, die sich mit sehr optimistischen Prognosen für kommerzielle Stromerzeugung für 2028 (Helion Energy) bzw. 2031 (TAE) geäußert haben, in diesem Bereich alternativer Konzepte angesiedelt.

### **2.2.3.1 Ion-Beam Fusion (Teilchenstrahl-Trägheitsfusion mit Schwerionen)**

Schwerionen-Fusionsreaktoren verwenden konvergierende Ionenstrahlen zur Kompression von Fusionspellets. Die in den 1980/90er Jahren in Europa und den USA durchgeführte Forschung wurden später zurückgefahren, weil keine ausreichend gleichmäßige Bestrahlung erzielt werden konnte.<sup>4</sup> In jüngerer Zeit wurde das Prinzip wiederbelebt, wobei statt der schweren Ionen zur Komprimierung von Brennstoffpellets die Ionen des Fusionsbrennstoffs selbst beschleunigt werden können. Ein prominentes Beispiel ist die  $\alpha$ -neutronische Fusionsstrategie, bei der Protonenstrahlen auf Bor-11 geschossen werden (W. J. Nuttall, 2022). Dieser Ansatz ähnelt aufgrund der Verwendung eines heißen Plasmas mit geringer Dichte in einer magnetischen Umgebung eher der magnetischen Einschlussfusion (MCF) als der traditionellen ICF. Dieser Ansatz wird von der US-amerikanischen Firma TAE Technologies verfolgt (welche 2026 mit Donald Trumps Medienunternehmen fusionieren möchte).

### **2.2.3.2 (Z-)Pinch**

Bei Z-Pinch-Konzepten fließt ein elektrischer Strom durch das Plasma und wird durch sein eigenes Magnetfeld komprimiert („gezwickt“) (Wurden et al., 2016). Ziel ist es, kurzzeitig die hohen Temperaturen und Dichten zu erreichen, die für Fusionsreaktionen nötig sind, allerdings ist der Z-Pinch technisch herausfordernd, da das Plasma oft instabil wird. Der Pinch erfolgt entlang der Z-Achse in einem dreidimensionalen Raum. Dies wird erreicht, indem ein massiver elektrischer Strom (bis zu 20 MA in der Z-Maschine der Sandia National Laboratories, New Mexico, USA) durch ein zylindrisches Plasma geleitet wird, wodurch ein Magnetfeld erzeugt wird, das das Plasma radial nach innen treibt und einen intensiven Kompressions- oder „Pinch“-Effekt erzeugt. Ein erheblicher Teil dieser kinetischen Energie wird in Röntgenstrahlen umgewandelt, die den Hohlraum auf hohe Temperaturen erhitzen und eine symmetrische

---

<sup>4</sup> Die Schwerionenforschung heutzutage u.a. am Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) des Brookhaven National Laboratory, dient grundlegenden wissenschaftlichen Zielen wie der Erforschung der Kernphysik und nicht der Anwendung der Fusionsenergie.

Bestrahlung des Pellets ermöglichen.<sup>5</sup> Die Brennstoffpellets können größer sein als in lasergesteuerten Systemen, wodurch potenziell eine höhere Fusionsenergie pro Schuss erzielt werden kann (bis zu 1,2 GJ, etwa 80-mal so viel wie bei Lasersystemen).

### 2.2.3.3 Field Reversed Configuration (FRC)

Bei der Feldumkehr-Konfiguration, der Field-Reversed Configuration (FRC), handelt es sich auch um ein magnetisches Einschlusskonzept, allerdings ohne zentrales Magnetfeld und Spulen im Inneren des Reaktors. Ein heißes Plasma wird in einer zylindrischen Kammer durch ein in sich selbst umgekehrtes Magnetfeld gehalten: Das Magnetfeld wird überwiegend vom Plasma selbst erzeugt und die Feldlinien schließen sich innerhalb des Plasmas. Dadurch entsteht ein sehr hoher Plasmadruck im Verhältnis zum Magnetfeldruck, was FRCs klein, potenziell effizient und gut für fortgeschrittene Brennstoffe macht. Diese Innovation wird durch große Stabilitätsprobleme bezahlt, welche bisher den Weg zu einem Demonstrationskraftwerk blockiert haben. Dennoch verfolgt ausgerechnet das aggressivste New Venture, Helion Energy, den FRC-Ansatz und hat bereits für das Jahr 2028 kommerzielle Stromproduktion angekündigt.

## 2.3 Kernfusion als Systemgut mit Front-end und Back-end

Die Nutzung von Kernfusion für militärische und/oder kommerzielle Anwendungen erfordert wesentlich mehr als die Auswahl einer Technologielinie und eine Fusion von einigen leichten Wasserstoffkernen. Wie kaum ein anderer Prozess ist Kernfusion vielmehr Teil eines großen, integrierten sozio-technischen Systems, inkl. physikalisch-chemischer Prozesse, Akteuren zur Ausübung bestimmter Tätigkeiten sowie eines übergeordneten Organisationsmodells. Im Folgenden liegt der Schwerpunkt auf den technischen Aspekten der Systemintegration; sozioökonomische und institutionelle Aspekte werden in den folgenden beiden Kapiteln ausführlicher behandelt.

### 2.3.1 Systemgut Kernfusion

Abbildung 7 vermittelt einen Überblick über die Elemente des Systems Kernfusion, inkl. der Wechselwirkungen zwischen einzelnen Produktionsstufen.<sup>6</sup>

Zur Kernfusion werden fusionsaffine Elemente, deren Gewinnung, Bearbeitung für die spätere Brennstoffeinsätze, etc., benötigt. Wir fokussieren auf die wesentlichen Fusionselemente, d.h. Wasserstoff, sowie Helium und Boron. Die Brennstofffertigung erfolgt teilweise getrennt und

---

<sup>5</sup> Die Z-Maschine erzeugt kurze, leistungsstarke Impulse (bis zu 50 TW) und erzeugt Röntgenstrahlen, die eine erhebliche implosive Kompression verursachen können. Zu den Innovationen im Bereich Z-Pinch gehören das Drahtarray-Verfahren, bei dem ein feiner Drahtkäfig verdampft wird, um während der Entladung Plasma zu erzeugen, und der dynamische Z-Pinch, der einen beweglichen Hohlraum für eine höhere Effizienz nutzt.

<sup>6</sup> Dieser Abschnitt orientiert sich an (Böhnlein et al., 2026; Wimmers, Böse, & Von Hirschhausen, 2026).

teilweise gemeinsam mit dem eigentlichen Kernfusionsvorgang. Der Pfeil zur Proliferation weist auf eine Gefahr bei der Nutzung des radioaktiven Wasserstoff-Isotops Tritium hin, welches zur Kernwaffenproduktion genutzt bzw. missbraucht werden kann. Die bisher genannten Bereiche werden als Front-End („upstream“) bezeichnet, d.h. sie befinden sich vor dem eigentlichen Fusionsprozess.

Der Bau des Reaktors selber ist neben dem Betrieb die größte Herausforderung. Wie alle bisher durchgeführten Fusionsexperimente zeigen, nehmen Vorbereitung und Durchführung des Baus der entsprechenden Anlagen viel Zeit und Kosten in Anspruch. Ein Extrem-Beispiel ist das internationale Kooperationsprojekt ITER, an dem seit 2005 gebaut wird und dessen erste Versuchsergebnisse (erst) Ende der 2030er Jahre vorliegen sollen. Beim Betrieb eines Fusionsreaktors müssten alle vorliegenden Erkenntnisse synergetisch ineinandergreifen.

Das Back-End („downstream“) besteht aus dem Rückbau der Anlage, dem anschließenden Abfallmanagement (insb. für radioaktive Stoffe) sowie – abermals – der Schnittstelle zur Proliferation. Bei den meisten geplanten Reaktorkonzepten entstehen „aktivierte“, d.h. radioaktive Stoffe, welche während der Nutzung und insb. danach sicher aufbewahrt werden müssen. Zwar sind die Entsorgungsfragen bei der Kernfusion weniger komplex als bei der Kernspaltung; dennoch stellen sie sich vom ersten Tag an und bedürfen einer Regulierung, damit nicht am Ende das böse Erwachen wartet. Proliferation bleibt auch im Back-End ein Thema.

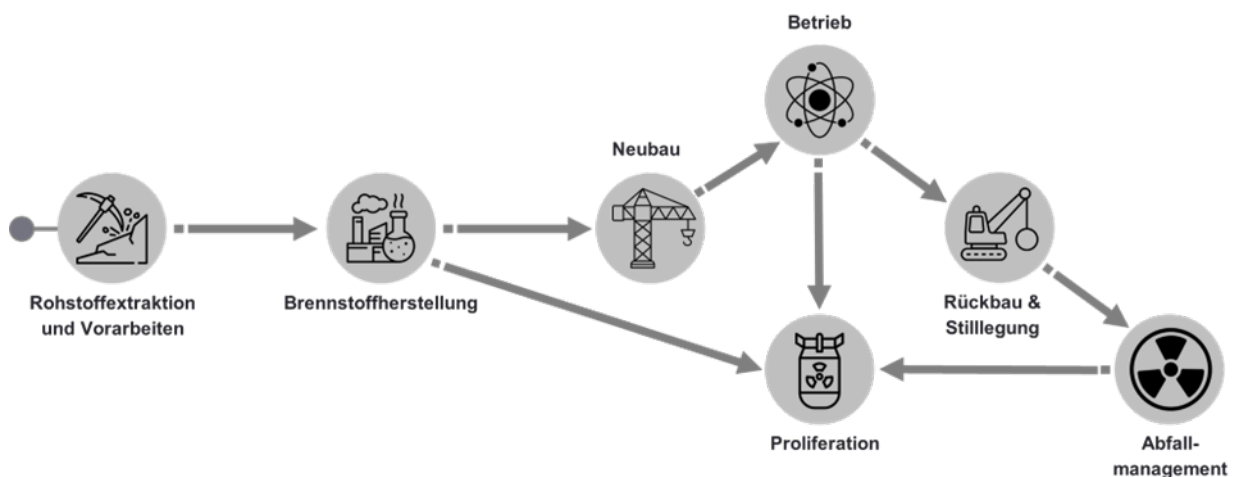


Abbildung 7: Stilisiertes technisches System der Kernfusion

Quelle: Eigene Übersetzung von (Böhnlein et al., 2026, S. 101).

### 2.3.2 Front-end: Fusionskerne und Brennstoffherstellung

Keines der für die Fusion verwendeten chemischen Elemente ist in natürlicher Form sofort nutzbar. Vielmehr erfolgt im Front-End die Aufbereitung der Elemente sowie deren Vorbereitung als „Brennstoffe“. Der wichtigste Schritt ist die Bereitstellung der Wasserstoff-Isotope H-2

(Deuterium) und H-3 (Tritium). Die Anreicherung des Basis-Wasserstoffatoms (mit lediglich einem Proton) mit einem Neutron zu Deuterium ist zwar chemisch einfach, aber in der Praxis kostenaufwändig. Alternativ kann Deuterium auch durch Elektrolyse aus Meerwasser gewonnen werden.

Die Produktion von radioaktivem Tritium, einem Wasserstoffisotop mit zwei Neutronen, ist sowohl aufwändig und teuer als auch gefährlich und ist mit erheblichen Sicherheitsmaßnahmen verbunden. Tritium ist nicht natürlich verfügbar, sondern wird derzeit in einer der seltensten Formen von Kernkraftwerken erstellt, den kanadischen Schwerwasserreaktoren (CANDU). Darüber hinaus ist auch eine Produktion in Leichtwasserreaktoren möglich, aber ebenfalls aufwändig. Aufgrund der Halbwertszeit von 12,6 Jahren kann Tritium nicht dauerhaft gelagert und somit für zukünftige Einsätze vorgehalten werden. Daher sehen aktuelle Kernfusions-Reaktorkonzepte das Erbrüten von Tritium in Echtzeit vor: In der Reaktorhülle, dem sogenannten Blanket, soll Tritium durch den Neutronenbeschuss von Lithium-6 erzeugt und zeitgleich in den Fusionsprozess eingebracht werden. Wie das funktionieren soll, ist allerdings immer noch unklar. Lithium-6 wiederum als Rohstoff für das Blanket ist auch nicht natürlich verfügbar, sondern muss bergtäglich abgebaut oder aus Meerwasser extrahiert werden.

Analoge Prozessschritte sind auch für andere Fusionselemente notwendig. Boron-11 als Grundlage der Proton-Boron-Fusion wird im Bergbau gewonnen und anschließend raffiniert. Die benötigten Protonen werden entweder aus Wasser oder aus Kohlenwasserstoffen extrahiert. Helium-3 als Grundlage der D-He-3 Fusion ist nicht natürlich auf der Erde vorhanden, sondern muss durch andere Fusionsprozesse gewonnen werden, z.B. die D-D Fusion. Eines Tages kann He-3 eventuell auch auf Raumfahrtmissionen gewonnen werden, z.B. auf dem Mond (Mazzucato, 2023).

### **2.3.3 Back-end: Rückbau und Entsorgung radioaktiver Abfälle**

Nach dem Betrieb müssen der Reaktor und die dazugehörige Infrastruktur zurückgebaut und entsorgt werden. Der Rückbau kerntechnischer Anlagen hat sich in den vergangenen Jahrzehnten bei Kernspaltungskraftwerken als eine Achillesverse herausgestellt, sowohl technisch als auch finanziell. Insgesamt waren 2024 von den 218 stillgelegten Kernspaltungsreaktoren erst 23 zurückgebaut worden, und davon wiederum nur 9 auf ein Niveau, welches alternative Nutzungen ermöglichte („greenfield“) (Schneider et al., 2025, S. 254). Bei der Kernfusion ist die Aktivierung von Bauteilen geringer als bei der Kernspaltung, jedoch sind i.d.R. Bauteile nahe dem Plasma durch Neutronenbestrahlung aktiviert.

Radio-„aktivierte“ Materialien müssen nach dem Rückbau von Menschen und Umwelt abgeschirmt und langfristig zwischen- bzw. später endgelagert werden. Dies ist insb. bei Reaktoren

der Fall, welche mit starken Neutronen im Fusionsprozess arbeiten, z.B. bei der D-T-Fusion. Diese Abfälle erfordern spezielle Lagerstätten, um Strahlungsrisiken zu mindern, insbesondere bei der Verwendung des radioaktiven Tritiums sowie aktivierter Materialien. Das während des Betriebs anfallende Abfallvolumen („Inventar“) kann je nach Reaktorkonstruktion und verwendeten Materialien erheblich variieren. Bemühungen um die Verwendung von Materialien mit reduzierter Aktivierung, wie z. B. Spezialstahl, zielen darüber hinaus darauf ab, die radioaktive Belastung durch Fusionsreaktoren zu minimieren (IAEA, 2023). Unabhängig davon müssen schwach- und mittelradioaktive Abfälle bis zu mehreren Hunderten von Jahren sicher gelagert werden, um die Risiken für die Umwelt und den Menschen zu minimieren. Somit sind die Herausforderungen der Entsorgung auch bei der Kernfusion erheblich, auch wenn sie nicht in den Größenordnungen hochradioaktiver Abfälle liegen (welche bis zu über 1 Millionen Jahre tiefengeologisch sicher gelagert werden müssen).

#### **2.3.4 Proliferationsgefahren bei der Kernfusion**

Wie bei der Kernspaltung gibt es auch bei der Kernfusion die Gefahr unkontrollierter Proliferation, d.h. der illegalen Weitergabe von spaltfähigen Elementen zur militärischen Nutzung. Dies Thematik ist Teil der „Dual-use“ Problematik, die bereits zur Zeit des Projekt Manhattan die Wissenschaftler beschäftigte, (Franck et al., 1945) und von Robert Oppenheimer und anderen nach dem Zweiten Weltkrieg explizit bei forschungspolitischen Entscheidungen eingefordert wurde (Acheson-Lilienthal Report, 1946). Englert und Kopp (2024, S. 17–21) identifizieren drei mögliche Proliferationsrisiken bei der Nutzung von Anlagen mit Deuterium-Tritium Fusion, bei der schnelle Neutronen produziert werden: i/ Die Nutzung der Neutronen zur Produktion von Plutonium aus fertilem Ausgangsmaterial (wie z.B. Uran); ii/ die Proliferation von waffenfähigem Tritium durch die einfache Verfügbarkeit größerer Mengen dieses für die Kernfusion zentralen Stoffes; sowie iii/ die Nutzung des Wissens aus der Laser-Trägheitsfusion für militärische Nutzungen („dual use“).

i/ Magnetfusionsreaktoren, welche mit Deuterium-Tritium Brennstoffen arbeiten, können durch das Einbringen von fertilen Materialien, insb. Uran oder Thorium, durch den Neutronenbeschuss Plutonium erzeugen. Zwar ist diese bei der Auslegung von Fusionsreaktoren nicht vorgesehen und würde den Aufbau sowie die Chemie/Physik erheblich komplizieren, jedoch bietet sich die Nutzung des (festen oder flüssigen) Blankets für den Brutprozess an. Auch mit geringen Mengen an fertilem Material können in einem Fusionsreaktor größere Mengen an Plutonium erzeugt werden. (Englert & Kopp, 2024, S. 17) nennen Mengen von 8 kg jährlich, der Menge des Plutoniums der Atombombe auf Nagasaki. Das Regelwerk zur Kontrolle dieser Proliferationsmöglichkeit muss ex-ante geklärt und dann auch entsprechend umgesetzt werden.

ii/ Derzeit werden relativ geringe Mengen an Tritium in Kernwaffenarsenalen gelagert und müssen – wegen der geringen Halbwertszeit (12 Jahre) – relativ kompliziert aus dem Betrieb von Schwerwasser-Spaltkraftwerken ersetzt werden. Bei einem Fusionsreaktor mit Brutblanket könnte eine erheblich größere Menge an Tritium produziert werden, als für den Fusionsprozess notwendig ist. Somit würde eine Abzweigung für militärische Zwecke ermöglicht, ein „ideales Reservoir“ (Englert & Kopp, 2024, S. 18). Im Gegensatz zu Spaltstoffen (Uran, Plutonium) gibt es gegenwärtig keine Überwachungsmaßnahmen für Tritium, jedoch wäre dies mit der Entwicklung von D-T Fusionsreaktoren notwendig.

iii/ Die Trägheitsfusion liefert aufgrund der Nutzung für militärische und kommerzielle Anwendungen ein typisches Beispiel für eine doppelte Nutzung, oder „Dual use“. Obwohl seit den Verhandlungen zum Teststoppverbotsvertrags 1996 keine Wasserstoffbomben nach dem Trägheitsprinzip mehr getestet worden sind, schreitet deren Entwicklung in Laboratorium und durch Rechnersimulation weiter fort. Diesbzgl. ist die Kernwaffenforschungseinrichtung Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) in Kalifornien führend, welche durch das aufsehenerregende Experiment 2022 zur „Renaissance“ der kommerziellen Kernfusion auf der Erde beitrug. Auch in Frankreich betont das Commissariat de l’Energie Atomique (CEA) mögliche kommerzielle Nutzungen des für militärische Zwecke entwickelten Projekts „Laser Mégajoule (LMJ)“. Englert und Kopp (2024, S. 19) leiten daraus ab, auch Nichtkernwaffenstaaten könnten sich mit der Trägheitsfusion die Strategie der Kernwaffenstaaten USA und Frankreich zu Nutze machen, Kernwaffentests in eine virtuelle Umgebung zu verlagern und damit die Einschränkungen zur Entwicklung bzw. Weiterentwicklung von Kernwaffen durch den umfassenden Teststoppvertrag zu umgehen.

### 3 Zwischenbilanz nach 75 Jahren

Wo stehen wir mit der Kernfusion, ein Jahrhundert nach Oliphant, Rutherford und Eddington, und 75 Jahre nach den ersten Überlegungen, die Kernfusion für energetische Nutzungen anwendbar zu machen? Das Kapitel beginnt mit einer Darstellung der Fortschritte der Grundlagenforschung zum Verständnis von Kernfusionsprozessen, wie sie u.a. durch die Theorie der Plasmaphysik, der Verbreiterung der Struktur von Reaktorkonzepten oder auch technischen Parametern zum Ausdruck kommen. Anschließend werden offene Fragen der energetischen Nutzung aufgeworfen, gibt es doch über Nutzungskonzepte heute dieselben Dispute wie seit Jahrzehnten: Elektrizität oder Wärme (z.B. für Wasserstoff), eher große oder eher kleine Rekordleistungen, welche „optimalen“ Volumina, etc. Da es keine funktionierenden Kernfusionskraftwerke gibt, muss auch jegliche Wirtschaftlichkeitsrechnung als rein hypothetische Fingerübung begriffen werden, seien es Investitionsrechnungen oder energiewirtschaftliche Systemanalysen; selbiges ist auch für die Klimarelevanz der Kernfusion festzustellen. Was bleibt ist die bleierne Schwere der „Fusionskonstante: Seit der Zeit nach dem 2. Weltkrieg hat sich die Vorstellung erhalten, in naher Zukunft einen Durchbruch der Kernfusion für eine nachhaltige Energieversorgung zu erleben. Vormalig ein Ansporn für die Community, ist die Fusionskonstante inzwischen eher zu einem mitleidigen Bonmot geworden: „Kernfusion ist immer einige Jahrzehnte entfernt...“

#### 3.1 Wissenschaftliche Fortschritte

##### 3.1.1 Es ist etwas passiert...

75 Jahre nach den ersten Versuchen, die Kernfusion nicht nur für militärische, sondern auch für kommerzielle Anwendungen nutzbar zu machen, kann festgestellt werden Es ist etwas passiert. Die Kernfusions-Community ist eine Realität und sie produziert Grundlagenforschung, eine Vielzahl von möglichen Technologielinien und theoretische Reaktorkonzepte für die Kernfusion, medizinische Anwendungen und Hoffnungen auf „mehr“.

Aus naturwissenschaftlicher Perspektive ist insbesondere bemerkenswert, dass mit der Kernfusion eine neue Disziplin „erfunden“ wurde, welche die Welt und das Weltall etwas verständlicher macht: Die Plasmaphysik. Da ein Großteil des Weltalls hierdurch erklärt werden kann, und der Transfer von der Kernfusion von der Sonne auf die Erde attraktiv ist, entwickelte sich seit den 1950er Jahren diese vormalig eher theoretische Richtung rasch weiter. Neben Grundlagenentwicklungen in der Plasmaphysik für Kernfusion wurden dabei auch konkrete andere Anwendungen unterstützt, z.B. plasmabasierte Raumfahrtantriebe und Niedertemperaturplasmen für Materialwissenschaft und Medizin. Allerdings ist der Wert der Kernfusions-Plasmaforschung für andere, nicht-energetische Nutzungen umstritten.

Des Weiteren hat sich ein bunter Strauß an Technologielinien entwickelt, welche die Kernfusion in allen Dimensionen ausreizt: Dies gilt insbesondere für die drei-dimensionalen Technologielinien wie den Tokamak, den Stellarator oder die Trägheitsfusion mit dem Hohlraum-Konzept. Aber auch einfachere zweidimensionale Konzepte sind heute wieder an der Tagesordnung, wie der Z-Pinch zur Einschließung und Kompression von Plasma durch ein starkes, selbst erzeugtes Magnetfeld. Dabei stellen sich – analog zur Kernspaltung – die 1950/60er Jahre als besonders innovativ dar: Die meisten der heute wieder aktivierten Reaktorkonzepte gehen auf grundlegende Erkenntnisse aus der Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg zurück.

Nichtenergetische Nutzungen wurden ebenfalls entwickelt: So werden die bei der Kernfusion bereitgestellten Neutronen heute auch für medizinische Zwecke verwendet. Die bei der Fusion (z.B. D-T) erzeugten Neutronen können genutzt werden, um medizinische Isotope effizient und sauber zu produzieren, z. B. Molybdän-99 für Krebsdiagnostik. Darüber hinaus ermöglicht die Neutronenbestrahlung neuartige Therapien, etwa bei schwer behandelbaren Tumoren, wie z.B. die Boron-Neutronen-Einfangtherapie. Allerdings handelt es sich um komplexe und bis heute nicht industriell vorliegende Verfahren, die mit anderen, u.a. der „klassischen“ Kernspaltung, konkurrieren.

### **3.1.2 ...und Fortschritte beim Tripel-Produkt**

Wollte man einen Indikator für den Fortschritt der Kernfusions-Grundlagenforschung herausgreifen so wäre es das Tripel-Produkt aus Fusionsdichte, -temperatur und -dauer des Einschusses. Wie in Kapitel 2 ausgeführt macht das Produkt eine Aussage über die Energieausbeute der Fusion: Zur Erreichung eines Gleichgewichts zwischen Output und dem energetischen Input ist ein Tripel-Produkt von mindestens  $6 \cdot 10^{23}$  keVs/m<sup>3</sup> erforderlich.

Abbildung 8 zeigt ausgewählte Reaktorkonzepte über die Zeit und deren höchstes erreichtes Tripelprodukt. Lag dieses Produkt beim ersten Reaktor („Zeta“) in der Größenordnung von  $10^{15}$ , war es beim ersten sowjetischen Tokamak, dem T-3, in den späten 1960er Jahren bereits auf  $10^{17}$  gestiegen. Die folgenden Jahrzehnte brachten verbesserte Werte und einen regelmäßigen Anstieg des „Weltrekords“ (Helmholtz Gemeinschaft et al., 2006; Wurzel & Hsu, 2022). Seit den 2020er Jahren sind erste Experimente zu verzeichnen, welche das kritische Tripel-Produkt sogar übersteigen. Dies ist z.B. für das Trägheitsexperiment der NIF im Herbst 2022 sowie für den Stellarator Wendelstein-7X der Fall. Auch der ITER sollte nach der ursprünglichen Planung das Kriterium erfüllen; davon ist aber aufgrund der permanenten Verschiebung wichtiger Entwicklungsschritte inzwischen nicht mehr auszugehen.

Die Branche selber feiert Fortschritte beim Tripel-Produkt gerne als Beleg für die Sinnhaftigkeit der Kernfusionsforschung und die Annäherung an kommerzielle Nutzungen. So beschreibt (Helmholtz Gemeinschaft et al., 2006) die Entwicklung des Tripel-Produkts seit den 1960er Jahren als eine quasi-Gesetzmäßigkeit, gleich dem Moore'schen Gesetz, demzufolge sich die Zahl

der Transistoren integrierter Schaltkreise regelmäßig verdoppelt (z.B. in 12, 18 oder 24 Monaten). Dabei wird allerdings verschwiegen, dass selbst diese verbesserten Werte keinerlei kommerzielle Bedeutung haben.

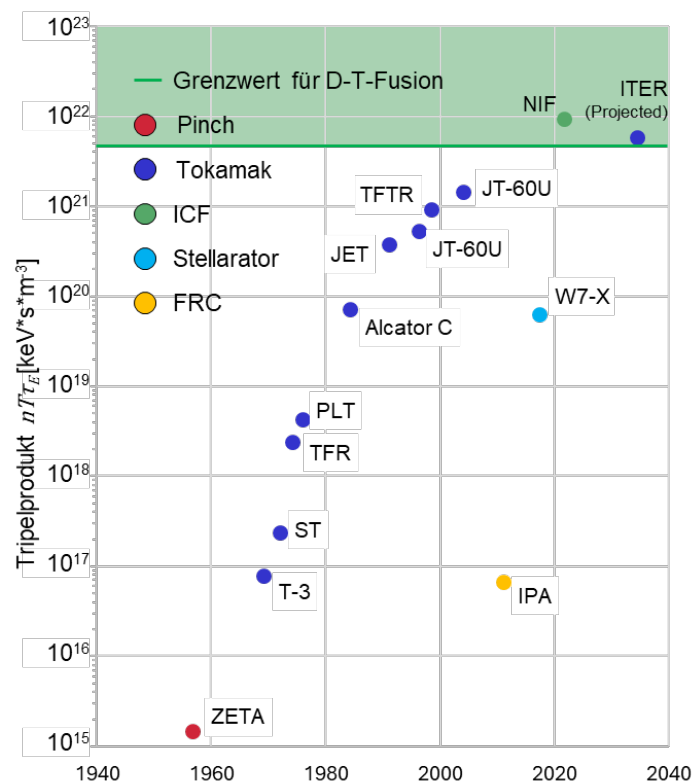


Abbildung 8: Entwicklung des Lawson'schen Tripel-Produkts für ausgewählte Reaktoren seit den 1950er Jahren

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf (Meschini et al., 2023, S. 2).

### 3.2 Offene Fragen (1): Technische Umsetzung

Trotz beachtlicher Forschungserfolge ist das ursprünglich ausgerufene Ziel der energetischen Nutzung nicht wesentlich nähergekommen. Bis heute gibt es auf die drei folgenden Fragen (und noch viele mehr) keine konkrete Antwort: i/ Welche Fusionselemente sollen verwendet werden und welche experimentelle Evidenz liegt vor, dass die theoretischen Ergebnisse praktisch erzielt werden?; ii/ Welche Materialien sind für welches Reaktorkonzept bei welchen Temperaturen vorgesehen, und wie ist der empirische Befund dazu heute?; iii/ Wie wird die dauerhaft, ununterbrochene Energieversorgung gesichert, inkl. die zeitnahe Breitstellung der Fusionselemente (im Blanket bzw. extern) und wie erfolgt die Abfuhr der Wärme zur energetischen Nutzung?

#### 3.2.1 Brennstoffe für Kernfusion

Ohne die oben genannten Fortschritte in der Grundlagenforschung abzuwerten, muss festgestellt werden, dass es auf diese Fragen heute – und auf absehbare Zeit – keine Antwort geben kann. So sind die in der Literatur vorgeschlagenen Fusionselemente für die Kernfusion noch

nicht in Echtzeit und über längere Zeiträume auf ihre Fusionseigenschaften getestet worden. Dies gilt für die „Mutter“ aller Fusionspläne, die Deuterium-Tritium Fusion: Diese seit den 1960er Jahren diskutierte Fusion sollte im 1985 verabredeten ITER-Experimentalreaktor getestet werden, ist jedoch nach vielzähligen Verschiebungen jetzt auf die späten 2030er Jahre verschoben worden. Aber auch zu alternativen Fusionskonzepten wie Deuterium-Helium-3 oder Proton-Boron-11 liegen keine Dauereperimente vor, die die Nachhaltigkeit und die chemisch-physikalischen Implikationen dieser Dauer-Fusionen belegen können.

### 3.2.2 Reaktormaterialien

Analog gibt es bzgl. der mit der Kernfusion auftretenden Belastungen der Reaktormaterialien bisher keine experimentell belegten Antworten. Dies bezieht sich nicht nur auf die Temperaturen, welche bei der „normalen“ D-T-Fusion ca. 150 Millionen Grad Celsius betragen, bei anderen Fusionselementen wie p-B-11 sogar bis zu über 1 Milliarde Grad Celsius. Die meisten Fusionsreaktoren sind extremen Neutronenflüssen ausgesetzt, die im Laufe der Zeit zu Versprödung, Aktivierung, Transmutation und letztlich zu einer strukturellen Verschlechterung der Materialien führen (Reinders, 2021; Peluso et al., 2023; Grünwald, 2024). Die dem Plasma ausgesetzten Komponenten, wie der Divertor und die erste Wand, müssen sehr hohen stationären Wärmeflüssen standhalten. Bei ITER werden thermische Belastungen von 10-20 MW/m<sup>2</sup> erwartet; bei einem Demonstrationsreaktor werden sogar noch höhere Anforderungen erwartet, die GW/m<sup>2</sup> überschreiten können (Grünwald, 2024). Diese Bedingungen führen zu Materialerosion, Rissbildung und Grenzflächenversagen. Zwar wird seit Jahrzehnten an diesen Materialien geforscht; dabei stehen aktuell RAFM-Stähle (reduced-activation ferritic-martensitic, niedrigaktivierbar ferritisch-martensitisch) im Mittelpunkt des Interesses. Langfristige, experimentell belastbare und verfügbare Lösungen sind jedoch nach wie vor nicht absehbar, auch weil Langzeitverhalten unter realistischen Fusionsbedingungen noch ungewiss ist. Darüber hinaus werden derzeit Ansätze des maschinellen Lernens getestet, um die Vorhersage und Minderung von Materialschädigungsmechanismen zu verbessern; jedoch ist die Leistungsfähigkeit dieser Ansätze, und insb. die Perspektive, dadurch die Zeiten physikalischer Experimente signifikant zu reduzieren, bisher noch begrenzt.

### 3.2.3 Balance of Plant: Energieabführung

Auch für die nachgelagerte Schnittstelle zwischen Kernfusion und strukturierter Energieabführung gibt es einen Strauß an Fragen, die heute genauso unbeantwortet bleiben wie seit Jahrzehnten. Dies bezieht sich sowohl auf die Magnet- als auch die Trägheitsfusion. Die Stabilität der Kernfusion ist bei den Technologielinien nicht gegeben: Bei der Magnetfusion ist die Plasmastabilität jenseits kürzester Einschusszeiten nicht gegeben, bei der Trägheitsfusion die sehr hohe Schussfrequenz von bis zu 10 pro Sekunde. Die Übertragung der Fusionsenergie im Blanket ist bis heute ungetestet. Wie überhaupt das Blanket (bei der Magnetfusion) ein „schwarzes Loch“

der Ingenieurkunst darstellt, werden diesem doch (ungeklärte) Aufgaben wie Wärmeabfuhr, der Tritiumerbrütung und gleichzeitig Strahlenschutz gleichzeitig auferlegt. Last but not least ist unklar, wie die Energie aus dem Blanket (Magnet einschluss) bzw. dem Hohlraum (Trägheit einschluss) abgeführt werden soll. Dies ist insb. bei der D-H<sub>3</sub> Fusion von Helion Energy in den USA der Fall, welche auf eine direkte Energieumwandlung („Induktion“) setzt, wohingegen die anderen Konzepte den Umweg über erhitztes Wasser und eine Turbinen-Generator-Stromerzeugung setzen. In beiden Fällen müssen Speichervorrichtungen die Kontinuität der Energieerzeugung für den Fall von Leistungsunterbrechungen absichern.

Die Zeitpläne bis zur industriellen Nutzung der Prozesse und Materialien sind nicht vorhersagbar. Fakt ist, dass selbst nach vielen Jahrzehnten intensiver Forschung und Entwicklung umfangreiche natur- und ingenieurwissenschaftliche Herausforderungen ungelöst geblieben sind. Englert und Kopp (2024, S. 13) weisen auch darauf hin, dass die Entwicklungsstufen vieler benötigter Technologien, sogenannte „Technology Readiness Levels“, nach wie vor gering sind.

### **3.3 Offene Fragen (2): Wirtschaftlichkeit**

Jenseits der erwähnten (und vieler anderer) ungelösten technischen Fragen ist unklar, wie ein aus heutiger Sicht nicht absehbarer kommerzieller Reaktor sich bezüglich der Wirtschaftlichkeit mit bestehenden Energietechnologien messen würde. Fakt ist, dass es bis heute und auf unabsehbare Zeit keine kommerzielle Energienutzung durch Kernfusion gibt bzw. geben wird, und daher als „Wirtschaftlichkeitsrechnungen“ rein hypothetischer Natur sind. Angesichts der Vielzahl ungelöster Fragen bei der Entwicklung eines kommerziellen Kernfusionsreaktors sowie extremer Unsicherheit bzgl. eines potentiellen Kraftwerkstyps ist es unmöglich, die Kosten einer in ferner Zukunft evtl. produzierten Kilowattstunde Strom auch nur im Entferntesten zu bestimmen.

Dennoch gibt es – wie bei anderen, nicht existenten Technologien – auch in der Kernfusionszene eine Fülle von „Wirtschaftlichkeitsrechnungen“, anhand derer eine bedeutende Rolle der Kernfusion in Energiesystemen der Zukunft vorhergesagt wird. So referenziert (Helmholtz Gemeinschaft et al., 2006, S. 45,46) auf eine Studie aus dem Jahr 1996, um für einen aus dem ITER (der damals lediglich auf Papier existierte und – wie oben dargestellt – evtl. 2039 den Probebetrieb mit echten Brennstoffen aufnimmt) abgeleitetes Fusionskraftwerk, „bei der zehnten Anlage ihrer Art zwischen fünf und zehn Cent pro erzeugte Kilowattstunde liegen“: Somit „könnte Fusion im Jahr 2011 etwa 20-30 Prozent des europäischen Strombedarfs decken.“ (ibid.) Ein ähnliches Ergebnis für die globale Energieversorgung erzielte die MIT-Studie (2024) „The Role of Fusion Energy in a Decarbonized Electricity System“ bei der Annahme von (ausgedachten) Kapitalkosten von \$ 5,600/kW im Jahr 2050: Kernfusion würde dann im Jahr 2100 3.000 TWh des Gesamtbedarfs der USA von etwa 9.000 TWh liefern, also ein Drittel. Spitzer, et al. (2025) und Mödinger, et al. (2026) fassen weitere hypothetische Analysen dieses Typs zusammen.

Der Vorteil der Beschäftigung mit solchen Wirtschaftlichkeitsrechnungen besteht darin, eine gewisse Struktur bzgl. der verwendeten Konzept und Algorithmen zu entwickeln und somit bestehende methodische Kontroversen greifbar zu machen. Andererseits weisen diese „Wirtschaftlichkeitsrechnungen“ auf Konstellationen und sozio-politische Dynamiken hin, welche weit jenseits ökonomischer Rationalitäten liegen. Beide Aspekte werden im Folgenden dargestellt. Darüber hinaus erfolgt auch eine Einordnung des übergeordneten energiewirtschaftlichen Credo der Kernfusions-Community, es bedürfe trotz des Durchbruchs der Erneuerbaren noch einer „Grundlast“, z.B. in Form von Kernfusionskraftwerken.

### 3.3.1 Zeitskalen und Betrachtungsperspektiven

Bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse sind ex-ante die betrachteten Zeitskalen und das Entscheidungskalkül der beteiligten Akteure zu klären. Diese Perspektiven werden sowohl konzeptionell als auch mit notwendigerweise geschätzten Zahlen aus der Literatur ausgeführt. Das folgende 3x3-Schema berücksichtigt unterschiedliche Zeitskalen (sehr langfristig, langfristig, kurzfristig) sowie unterschiedliche Betrachterperspektiven: Betriebswirtschaftlich, energiewirtschaftlich und gesamtwirtschaftlich (Tabelle 2).

~ Bzgl. der Zeitskalen lassen sich eine sehr lange, eine lange sowie eine kurze Frist unterscheiden. Die sehr langfristige Perspektive beinhaltet die sozio-technische Beschäftigung mit Fragen kommerzieller Nutzung der Kernfusion von den Anfängen, sagen wir seit den 1950er Jahren, bis zu potentiellen Anwendungen zu einem unbekanntem Zeitpunkt in der Zukunft, sowie den sich anschließenden Rückbau und die Entsorgung der radioaktiven Abfälle. Insgesamt dürfte diese Perspektive mehrere Jahrhunderte umfassen. Unter der langen Frist versteht man eine Periode, in der Entscheidungen bezüglich Investitionen in neue Anlagen oder neue Technikgeneration zu treffen sind, d.h. der Bereich von etwa 30 – 50 Jahren. Dies wäre nach aktuellem Stand der Mindestzeitraum, in dem ein kommerzielles Fusionskraftwerke theoretisch entstehen könnte. Kurzfristige Wirtschaftlichkeitsanalysen beziehen sich dagegen auf den Betrieb eines (hypothetisch bereits in Betrieb befindlichen) Kernfusionskraftwerks in einem Energiemarkt und der Frage, ob dieses angesichts zu erwartenden Wettbewerbs- und anderer Technologieentwicklungen überhaupt zum Zuge bzw. „in den Markt“ kommen würde.

~ Die Betrachterperspektive spielt eine Bedeutung bei der Wahl der Zielfunktion, d.h. welcher „Typus“ von Wirtschaftlichkeitsrechnung eigentlich durchgeführt werden soll. Die in der Öffentlichkeit wohl geläufigste ist die einzelwirtschaftlich betriebswirtschaftliche Perspektive, d.h. die Frage, ob sich die Investition oder der Betrieb von Kernfusionskraftwerken für einen (privaten oder öffentlichen) Investor aus einzelwirtschaftlicher („kapitalistischer“) Sicht lohnt. Die energiewirtschaftliche Perspektive betrachtet insbesondere Angebot und Nachfrage auf den Energiemärkten (z.B. Strom, Industrie, Wärme, Verkehr) und den Wettbewerb zwischen Energieträgern (z.B. zwischen Atomenergie, Kohle, Erdgas und Erneuerbaren). Hier ist eine

Systembetrachtung der potentiellen Bedeutung von Kernfusion in zukünftigen Energiesystemen notwendig. Dagegen fragt die gesamtgesellschaftliche Perspektive, ob die Gesellschaft evtl. in der Hoffnung auf zukünftige Leistungen in eine Technologie investieren sollte, welche heute eindeutig unwirtschaftlich ist, und welche Gründe dafür bzw. dagegen sprechen. Dabei müssen Investitionen in Forschung & Entwicklung sowie die i.d.R. von der Öffentlichkeit getragenen Kosten von Entsorgung radioaktiver Abfälle und Proliferationsrisiken berücksichtigt werden.

Tabelle 2: Wirtschaftlichkeitsanalysen: Zeitskalen und Betrachterperspektiven bei der Kernfusion

		<u>Zeitskalen</u>		
		(1) Sehr lange Frist (mehrere Jahrhunderte)	(2) Lange Frist (> Investitions-zyklus ~ 30-50 Jahre)	(3) Kurze Frist (fixe Kapazitäten ~ 1-5 Jahre)
<u>Betrachtungsperspektiven</u>	(1) Einzelwirtschaftliche, betriebswirtschaftliche Perspektive	./.	Rentabilität von Investitionen?	Betriebskosten
	(2) Energiewirtschaftliche Perspektive	Kernfusion als Lösung aller energiewirtschaftlichen Probleme?	Verhältnis Kernfusion zu anderen Energieträgern	Dispatch im Energiesystem
	(3) Gesamtwirtschaftliche Perspektive, inkl. F&E, Entsorgung und Proliferation	Berücksichtigung aller („externer“) Kosten: F&E- und Demonstrator, Rückbau, Entsorgung, Proliferation	Staatliches Organisationsmodell?	./.

Quelle: Adaptiert von (von Hirschhausen, 2023, S. 74–76).

### 3.3.2 Betriebswirtschaftliche Betrachtung

Aus einer betriebswirtschaftlichen Perspektive ist vor allem danach zu fragen, welche Kosten kurz- und langfristig anfallen, und welche Erlöse dem gegenüberstehen. Daraus lassen sich Schlüsse daraus ziehen, ob sich der Bau und der Betrieb eines Fusionskraftwerks eventuell lohnt. Dabei ist eine Unterscheidung in eine kurz- und langfristige Zeitskala nützlich.

#### 3.3.2.1 Kurzfristige Betrachtung: Rahmenbedingungen für die Einsetzbarkeit im Strom- bzw. Energiemarkt

Eine erfolgreiche Eingliederung eines Fusionskraftwerks in ein Energiesystem setzt die ökonomische Konkurrenzfähigkeit des Kraftwerks voraus. Nähme man an, ein Kernfusionskraftwerk hätte eine Netto-positive Strombilanz, d.h. produziert mehr Strom als es verbraucht, müsste es „nur“ die Anfahrtskosten durch den Verkauf von Strom wieder einspielen. Darüber hinaus stellte

sich die Frage nach der Verfügbarkeit der Anlage. Insbesondere in den ersten Jahren ist mit hohem Verschleiß und der Notwendigkeit zum Austausch von Materialien zu rechnen. Auch bei Produktionsausfällen bleiben große Kostenblöcke bestehen, für die dann keine Deckungsbeiträge erzielt werden könnten.

### **3.3.2.2 Langfristige Perspektive: Kostenkomponenten, Lerneffekte und Stromgestehungskosten (LCOE)**

Bei der langfristigen Perspektive muss die Investitionsentscheidung (für ca. 30-50 Jahre) und deren Kompatibilität mit dem zukünftigen Energiesystem geprüft werden. Beides ist hoch spekulativ. Dennoch bekommen die so ermittelten Zahlen genug „normative Kraft des Faktischen“, um eine gewisse Bedeutung in aktuellen Diskussionen zu erhalten.

#### **3.3.2.2.1 Kostenkomponenten für den ITER**

In der Kategorie „Kostenvorhersagen nicht existierender Technologien“ sei im Folgenden eine Abschätzung der notwendigen Investitionen in ein Kernfusionskraftwerk dargestellt, die für das Denken in der Kernfusions-Community repräsentativ ist: (Helmholtz Gemeinschaft et al., 2006, S. 45-49) leitet aus den von (Hender et al., 1996) vorgenommenen Schätzungen eines (in den späten 2030 in Betrieb geplanten) Forschungsreaktors, dem ITER, die potentiellen Kosten für ein Fusionskraftwerk ab (Abbildung 9). Die größten Kostenkomponenten sind die Gebäude sowie die Magneten (Hauptfeld und Transformatoren), darüber hinaus stellt auch das Blanket, die Wand mit Abschirmungen des Brennstoffkreislaufs, einen erhebliche Kostenposten dar. Hierzu kommen Kosten aus dem thermischen Kraftwerksteil, der Stromversorgung, etc. Die Unterschiede zwischen den Kosten für den Experimental-ITER und dem tatsächlichen Kernfusionskraftwerk ergeben sich durch den Vergleich der benötigten Kompetenzen „mit“ bzw. „ohne“ tatsächliche Stromerzeugung: Beispielsweise sind das Blanket und die Abschirmung im Kraftwerk umfangreicher als im Experimentalreaktor, also auch teurer. Entsprechend dieser (hypothetischen) Kosten werden für den ITER etwa 4.500 €<sub>1996</sub>/kW veranschlagt (entspricht etwa 8.000 €<sub>2025</sub>/kW). Das DEMO-Kernfusionskraftwerk wird auf 5.000 €<sub>1996</sub>/kW geschätzt (dies entspricht etwa 9.000 €<sub>2025</sub>/kW).

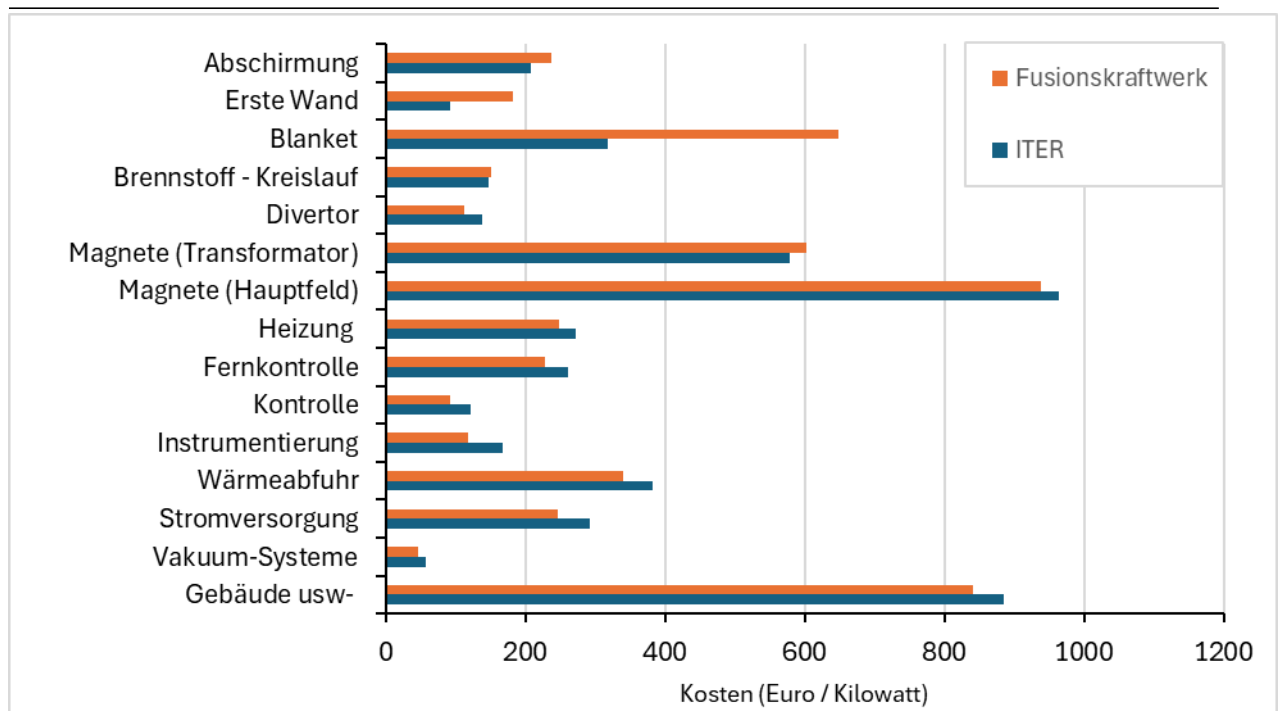


Abbildung 9: Beispiel für eine hypothetische Kostenschätzung (LCOE) eines zukünftigen Kernfusionskraftwerks

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis von (Hender et al., 1996).

### 3.3.2.2 Lernkurveneffekte vom ITER zur DEMO-Anlage

Im nächsten Schritt dieser Wirtschaftlichkeitsrechnung erfolgt eine Annahme bzgl. der „Lernkurveneffekte“ für den Fall, das nicht nur ein Demonstrationskraftwerk, sondern im Anschluss zehn kommerzielle Fusionskraftwerke gebaut würden. Dann kann man i.d.R. davon ausgehen, dass die Kosten aufgrund von Massenproduktion, aber auch Lerneffekten für die Herstellung, tendenziell sinken.<sup>7</sup> Unter Berücksichtigung von weiteren Parametern wie Lastverteilung und Austauschfrequenz bestimmter Aggregate werden somit die Stromgestehungskosten („Levelized Costs of Electricity, LCOE) von €cents<sub>1996</sub> 5-10/kWh ermittelt (Helmholtz Gemeinschaft et al., 2006, S. 46); dies entspricht heute etwa €cents<sub>2025</sub> 9-18/kWh.<sup>8</sup> Zum Vergleich: Der entsprechende Wert für Solar-PV Energie liegt bei ca. €cents<sub>2025</sub> 3-5/kWh (Lazard Ltd, 2024).<sup>9</sup>

<sup>7</sup> S. zu Lernraten z.B. Tokimatsu et al. (2002, 2003). Es ist aber auch der umgekehrte Fall denkbar, dass die Kosten für spätere Anlagen steigen, so wie es für Kernspaltungskraftwerke in den USA (Joskow, 1982) sowie Frankreich (Grubler, 2010) gekommen ist.

<sup>8</sup> Helion Energy spricht von wesentlich niedrigeren Werten um 1 UScent/kWh, was weiter unterhalb der heutigen Strompreise liegt, allerdings ohne laufenden Reaktor und ohne Quellen für die Berechnung.

<sup>9</sup> Weitere Literatur: Han, W.E. and D.J. Ward (2009). Revised assessments of the economics of fusion power. *Fusion Engineering and Design* 84(2): 895-98.; Tokimatsu, K., Asaoka, Y., Konishi, S., Fujino, J., Ogawa, Y., Okano, K., Nishio, S., Yoshida, T., Hiwatari, R. and K. Yamaji (2002). Studies of breakeven prices and electricity supply potentials of nuclear fusion by a long-term world energy and environment model. *Nuclear Fusion* 42(11): 1289-98. <https://acee.princeton.edu/wp-content/uploads/2016/05/ACEE-Fusion-Distillate-Article-4.pdf>.

### 3.3.2.2.3 Schätzungen von Investitionskosten anderer Reaktoren

Die in (Abbildung 10) gezeigte Auswertung zeigt auf 74 Datenpunkte zu sogenannten „overnight construction costs“, die nur die Bau- und Materialkosten eines Kraftwerks berücksichtigen. Dabei wird zwischen den Technologielinien des magnetischen Einschlusses und der Trägheitsfusion unterschieden. Andere Kostenkomponenten wie Finanzierungs-, Betriebs-, Wartungs- und Brennstoffkosten werden hier also nicht berücksichtigt. Die Auswertung ergibt einen durchschnittlichen Wert von 6.000 USD pro kW.<sup>10</sup>

Bei der Darstellung dominieren eindeutig die vormals als „Königslösung“ betrachteten Tokamaks (blaue Punkte): Diese sind in der Vergangenheit (1980/1990er Jahre) dominant und stellen nach 2000 alle 11 verfügbaren Beobachtungspunkte. Darüber hinaus fallen die beiden Ausreißer aus dem Jahr 1990 ins Auge, welche besonders niedrige Kosten von USD 500 bzw. 1.000 aufweisen. Auch der höchste Beobachtungspunkt (über USD-16.000/kW im Jahr 2022) ist ein Tokamak. Andere Technologielinien tauchen eher im Mittelfeld auf. Abgesehen von den beiden Ausreißern steigt die Varianz der Kosten im Lauf der Zeit leicht an.

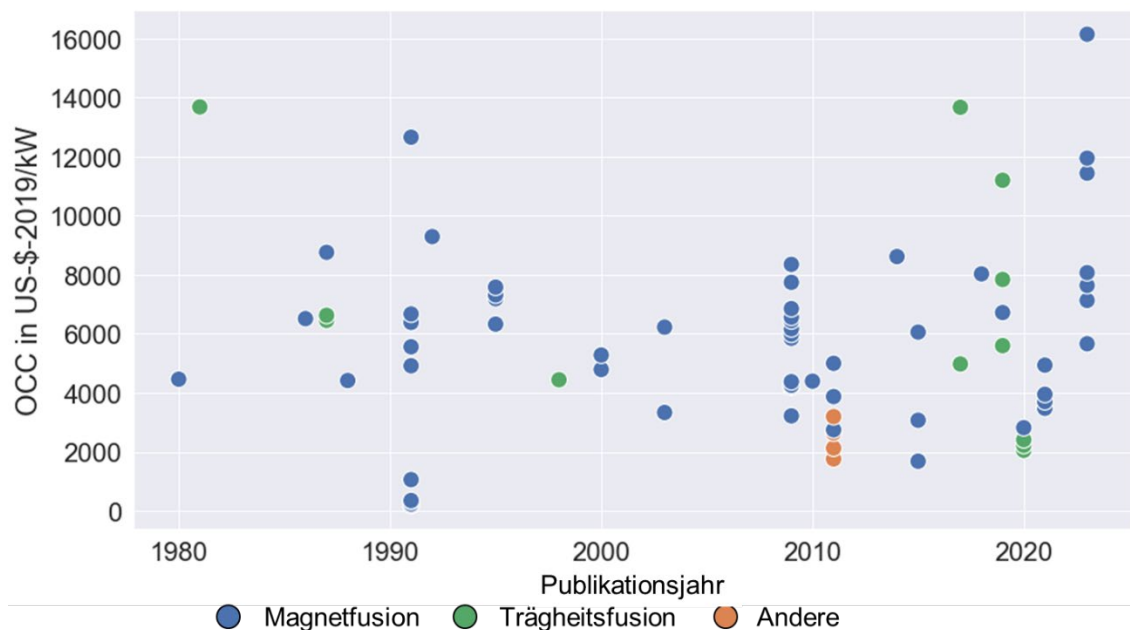


Abbildung 10: Baukosten („overnight construction cost“) Werte normiert nach USD<sub>2019</sub> pro kW für diverse Kernfusionskonzepte in diversen Publikationen von 1980 bis 2023.

Quelle: Eigene Zusammenstellung aus der zitierten Literatur.

<sup>10</sup> Aus heutiger Sicht scheint dieses Kostenniveau niedrig, denn große Infrastrukturprojekte sind mit hoher Komplexität konfrontiert, die oftmals zu Verzögerungen und damit verbundenen Kostensteigerungen führen (Bärenbold et al., 2024). Deshalb ist der o.g. Mittelwert als optimistisch einzuschätzen und insbesondere aufgrund der fehlenden technologischen Verfügbarkeit und mangelnden Erfahrungen im Fusionsreaktorbau kritisch zu hinterfragen.

### 3.4.2.2.4 Stromgestehungskosten (LCOE) in der weiteren Literatur

Seit über 40 Jahren werden mittels Kostenkalkulationsmodellen, wie den Programmen GENE-ROMAK<sup>11</sup> oder ARIES<sup>12</sup>, Prognosen über die Kosten hypothetischer Kernfusionsreaktoren für die kommerzielle Nutzung zur Stromerzeugung vorgenommen. Eine Analyse von 16 Publikationen, veröffentlicht zwischen 1981 und 2023, zeigt ein heterogenes Bild von Kostenannahmen.<sup>13</sup> Die meisten Prognosen beschränken sich auf Magnetfusionskonzepte wie den Tokamak, während einzelne Referenzen Kosten für andere Konzepte, wie ein ionenbasiertes Reaktorkonzept, prognostizieren. Des Weiteren umfassen die Daten sogenannte „n-th-of-a-kind“-Kostenannahmen. Diese gelten also für Kraftwerke, denen schon einige baugleiche Projekte vorangegangen sind und implizieren Lerneffekte, die zu Kostenreduktionen führen. Analog zu Kernspaltungsprojekten sind solche Annahmen ohne vorliegende, empirische Evidenz sehr kritisch zu hinterfragen.<sup>14</sup>

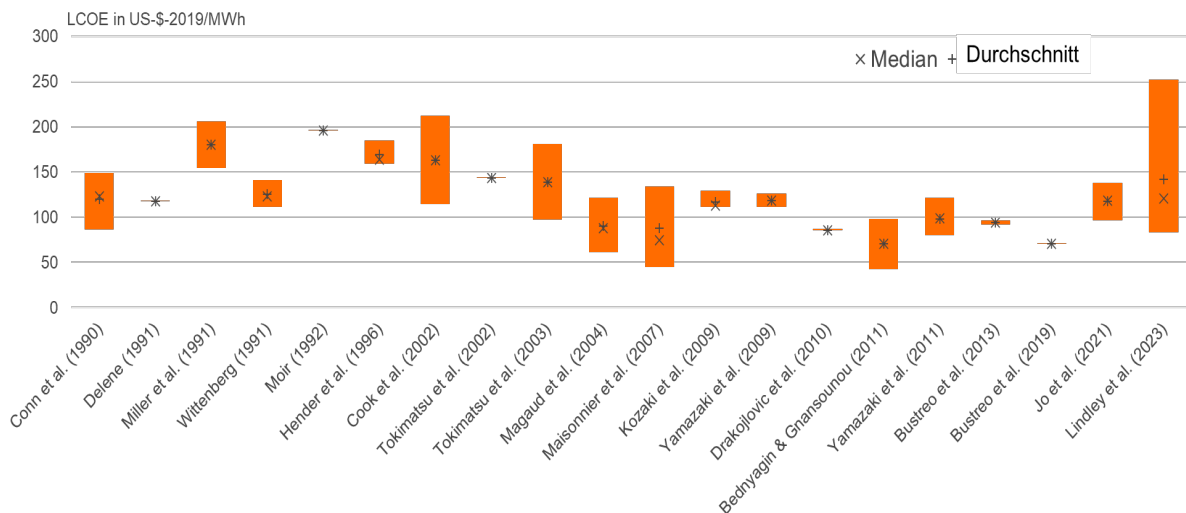


Abbildung 11: Analyse der Stromgestehungskosten (LCOE)

Quelle: Eigene Darstellung auf der Basis der zitierten Literatur.

Analog sind Kostenprognosen sogenannter Stromgestehungskosten (LCOE, Levelized Cost of Electricity) einzuordnen, die die zukünftigen Kosten des aus einem kommerziellen Fusionskraftwerk erzeugten Stroms prognostizieren (Abbildung 12). Auch hier gehen die Schätzungen weit auseinander. Der geringste Wert ist 43 USD pro MWh und der höchste 252 USD pro MWh. Im

<sup>11</sup> Jerry G. Delene (1991): Updated Comparison of Economics of Fusion Reactors With Advanced Fission Reactors. *Fusion Technology* 19 (3P2A): 807–12.

<sup>12</sup> R. L. Miller, W. R. Spears, R. Hancox, and R. A. Krakowski (1991): Comparison of Euratom and U.S. Estimates of Fusion Reactor Costs. *Fusion Technology* 19 (3P2A): 813–19.

<sup>13</sup> Aufgrund der großen Anzahl wird hier auf eine vollständige Auflistung aller Referenzen verzichtet. Alle Informationen zur Analyse und die hier gezeigten Daten können auf GitHub abgerufen werden.

<sup>14</sup> Analoge Diskussionen möglicher zukünftiger Kernspaltungsreaktoren finden sich bei (Wimmers et al., 2024) für großkapazitive Reaktoren und (Steigerwald et al., 2023) für Reaktoren mit geringer Kapazität.

Mittel liegen die Schätzungen bei 126 USD pro MWh. Abbildung 11 zeigt die verschiedenen Werte einzelner Referenzen. Zusätzlich beinhaltet die Abbildung eine Berechnung der Stromgestehungskosten basierend auf den oben präsentierten Werten zu den OCC.<sup>15</sup>

### **3.3.3 Energiewirtschaftliche Betrachtung**

Aus energiewirtschaftlicher Perspektive stellt sich die Frage der Einordnung der Kernfusion im Energiesystem der Zukunft, d.h. neben dem Stromsektor auch anderen Sektoren wie Verkehr, Industrie und Wärme. Außerdem müssen technologische Entwicklungen in anderen Sektoren, z.B. zur Abschätzung der Nachfrage, als auch im Energiesektor, z.B. zur Abschätzung der relativen Wettbewerbsfähigkeit unterschiedlicher Energieträger, vorgenommen werden. Kurzfristig ähnelt die energiewirtschaftliche Perspektive der betriebswirtschaftlichen, insb. bzgl. der Wettbewerbsfähigkeit der Kernfusion im kurzfristigen Strommarkt, dem „Dispatch“. Käme Kernfusion gegenüber anderen Energieträgern überhaupt zum Zuge? Dagegen ist die langfristige energiewirtschaftliche Analyse breiter angelegt und beinhaltet Faktoren wie Technologieentwicklung und Geopolitik.

#### **3.3.3.1 Kurzfristige Betrachtung: Rahmenbedingungen für die Einsetzbarkeit im Strom- bzw. Energiemarkt**

Bei der kurzfristigen energiewirtschaftlichen Betrachtung wird davon ausgegangen, dass die Technologie zur Verfügung steht und sich bei der Einsatzplanung am Energiemarkt mit anderen, ebenfalls zur Verfügung stehenden Technologien, messen lassen muss. Diesbezüglich hätte ein Kernfusionskraftwerk eine relativ gute Ausgangsposition, weil – bei Vernachlässigung der Fixkosten – die variablen Kosten der Strom- bzw. Energielieferung relativ gering sein dürften. Damit hätte die Kernfusion eine ähnliche Kostenstruktur wie die Solarenergie (oder andere Erneuerbare mit vernachlässigbaren variablen Kosten) in Verbindung mit einer Absicherung der Dauerlast durch Speichieranlagen und andere Flexibilitätsoptionen.

Zur Integration von Kernfusionskraftwerken in den Energiemarkt müssten zwei grundsätzliche Systemfragen geklärt werden: i/ Wie erfolgt die Preissetzung? Und: ii/ wie kann das Risiko von Betriebsausfällen abgesichert werden? Beim gegenwärtig fast weltweit praktizierten „Energy-only Markt“ wird der Strompreis durch die variablen Kosten der teuersten, gerade noch zum Einsatz kommenden Technologie ermittelt. Im Falle eines Systems, welches nur aus Solar-PV (bzw. anderen Erneuerbaren) und Kernfusionskraftwerken bestünde, wäre der Strompreis gleich 0, d.h. weder das Kernfusions- noch das Solar PV-Kraftwerke würden für ihre Stromlieferungen einen Deckungsbeitrag erzielen.<sup>16</sup> Somit wäre eine sehr grundlegende Reform des Marktdesign

---

<sup>15</sup> Wir unterstellen eine Bauzeit von 5 Jahren, Zinsen auf geliehenes Kapital von 7%, eine Reaktorlebensdauer von 60 Jahren, einen Kapazitätsfaktor von 85% sowie literaturbasierte Annahmen zu Betriebskosten.

<sup>16</sup> Vgl. zu anderen Darstellungen, in dem ein wettbewerblicher Energy-Only Markt mit auskömmlichen Preisen Investitionsanreize setzen soll (Antweiler & Muesgens, 2025; Schmidt, 2025).

erforderlich. Hierbei müsste die Kapazität des Energieangebots finanziert werden, d.h. der Bau der Anlage (Fixkosten). Wenn dem so wäre, bestünde immer noch die Hürde für die Kernfusion, mit den (drastisch fallenden) Durchschnittskosten eines Solar-PV-Speichersystems konkurrieren zu müssen. Auch dürften beim (hypothetischen) Kernfusionskraftwerke die Erhaltungskosten (Maintenance) auf absehbare Zeit höher liegen als bei der Solarenergie.

Konkrete Zahlen bestätigen den strukturellen Kostennachteil der Kernfusion gegenüber erneuerbaren Energien. So liegen die LCOE für großflächige Solarenergie 2024 bei ca. €cents<sub>2025</sub> 3-5/kWh und für (Onshore-)Wind bei 4-6 bei ca. €cents<sub>2025</sub> 3-5/kWh (Lazard Ltd, 2024). Rechnet man konservativ einen Aufschlag für die Kompensation der Variabilität („Flexibilitätsoptionen“) von 50% dazu, liegt man bei Kosten fest verfügbarere (englisch: „firm“) Stromerzeugung von 4,5 – 9 €cents<sub>2025</sub>. Dies liegt immer noch unterhalb des Durchschnittswertes für (hypothetische) Kernfusionskraftwerke, welche mit den dargestellten erheblichen Unsicherheiten verbunden sind.

Darüber hinaus ist auch bei Kernfusionskraftwerken mit einer hohen Variabilität zu rechnen. So ist das Risiko eines längerfristigen Betriebsausfalls ist beim Kernfusionskraftwerk mindestens in den ersten Jahrzehnten groß. Darüber hinaus müssen wichtige Bauteile wie das Brutblanket, evtl. auch Teile der ersten Schutzwand, relativ kurz nach Aktivierung ausgetauscht werden, wofür die Anlage heruntergefahren werden muss. Wollte das Kernfusionskraftwerke Dauerleistung zur Verfügung stellen, müssten zwei Blöcke nebeneinander gebaut werden, von denen einer nur als Reserve eingesetzt würde. Dies würde den Fixkostennachteil gegenüber der Solar-PV-Batterielösung erheblich verstärken.

### **3.3.3.2 Langfristige Betrachtung: Kernfusion im Energiesystem der Zukunft**

In der energiewirtschaftlichen Literatur, welche die Umweltschäden fossiler Energieträger (z.B. in Form von Klimawandel, etc.) ernst nimmt und keine fiktiven Annahmen bzgl. nicht verfügbarere kostengünstiger Technologien (wie z.B. Kernkraftwerke der Zukunft) macht, herrscht Konsens, dass im Energiesystem der Zukunft die mit Abstand kostengünstigste Energieerzeugung aus erneuerbaren Energien, insb. Sonnenenergie, stammt. So kommt die Studie des acatec-Projekts „Energiesysteme der Zukunft“ zu dem Schluss, dass in Zukunft „Grundlastkraftwerke“ zur Absicherung der Variabilität von Erneuerbaren nicht mehr benötigt werden (Weidlich et al., 2026). Dazu kommt, dass auch die Erneuerbaren Lerneffekte aufweisen, die über die vergangenen Jahrzehnte erheblich waren. So rechnet man für Solarenergie mit einer weiteren Halbierung der Stromgestehungskosten bis zum Jahr 2050, auf ca. 1-1,5 €<sub>2025</sub> /kWh. Auch die Kosten von Batteriespeichern als Flexibilitätsoption befinden sich seit mehreren Jahren in freiem Fall (Lazard Ltd, 2024). In der längeren Frist wird die Fotovoltaik daher den Kostenvorteil gegenüber der Kernfusion eher noch steigern.

Der Vergleich mit aktuellen Stromgestehungskosten weist somit die (hypothetische und optimistische) Schätzungen eines Kernfusionskraftwerks als nicht wettbewerbsfähig aus: Die Kosten für Strom aus Solar-PV (bzw. Wind) liegen heute im mittleren einstelligen €cent-Bereich und somit etwa der Hälfte des Fusionskraftwerks. Selbst wenn man annähme, dass die Systemkosten, u.a. Batteriespeicher, bei den Erneuerbaren höher wären als bei der Kernfusion (wofür es nur eine geringe Plausibilität gibt), so verbleibt noch eine erhebliche Marge bei den Gesamtkosten. Im Ergebnis ergeben sich keine günstigen energiewirtschaftliche Perspektiven für die Kernfusion, auch nicht in der langen Frist. Die energiewirtschaftlichen Trends der vergangenen Jahrzehnte legen nahe, dass Kernfusion, selbst wenn sie eines Tages steuerbare Energie zur Verfügung stellen könnte, im Energiesystem der Zukunft nicht wettbewerbsfähig wäre. Dieser Konsens in der energiewirtschaftlichen Literatur hat sich auch in der Community durchgesetzt, welche nicht direkt von dem Narrativ unendlicher, kostengünstiger und sauberere Energie profitiert, u.a. (Grunwald et al., 2002; Reinders, 2021; Smil, 2023, Kapitel 4; acatech et al., 2024; Grunwald, 2024; Kleidon & Lesch, 2024). Auch ist diese Einschätzung alles als neu: Unabhängige Analysen waren von Anfang an sehr kritisch bzgl. der möglichen Wettbewerbsfähigkeit von Fusionsreaktoren. So kommt das Lehrbuch „Atomkraft“ aus dem Jahr 1960 zum Schluss, Fusionsreaktoren würden „wahrscheinlich wesentlich kostspieliger als Spaltungsreaktoren werden“, die ihrerseits weit von der Wettbewerbsfähigkeit entfernt waren.<sup>17</sup> Daran hat sich bis heute nichts geändert.

### **3.3.4 Gesamtwirtschaftliche Betrachtung**

Noch komplexer, und für die Kernfusion noch weniger attraktiv, stellt sich die gesamtwirtschaftliche Perspektive dar. Diese – manchmal auch als wohlfahrtsökonomische oder gesellschaftliche Perspektive bezeichnet – geht über die einzel- bzw. energiewirtschaftliche Sicht hinaus und berücksichtigt auch nicht-monetäre Nutzen und Kosten, die aggregiert werden und dann ein Maß für die gesamtwirtschaftliche Vorteilhaftigkeit bilden („Nutzen-Kosten-Verhältnis“). Aus einer gesamtwirtschaftlichen Perspektive wäre die Kernfusion dann sinnvoll, wenn der Nutzen für die Individuen bzw. für die gesamte Gesellschaft die anfallenden Kosten übersteigt und es keine anderen Technologien mit noch besserem Nutzen: Kosten-Verhältnis gibt.<sup>18</sup> Die gesamtwirtschaftliche Perspektive ist daher etwas „abgehoben“ und sehr stark von subjektiven Bewertungen und Präferenzen geprägt.

#### **3.3.4.1 Potenzielle Nutzen**

Der entscheidende Nutzen, welcher von Verfechtern der Kernfusion seit den 1950er Jahren ins Feld gezogen wird, ist kostengünstige und unbegrenzte Energieerzeugung, die eines Tages

---

<sup>17</sup> „Wir sollten daher vorläufig dem Bau von Kernverschmelzungsreaktoren nicht mehr Zeit widmen ...“ (Münzinger, 1960, S. 169).

<sup>18</sup> (Hanusch, 2011).

ermöglicht würde. Dies wurde gerade für ein nachhaltiges, Erneuerbaren-basiertes Energiesystem der Zukunft verneint: Die in den 1950er Jahren sicherlich attraktive Option stellt heute keinen Nutzen mehr dar, gibt es doch inzwischen andere kostengünstige, zuverlässige und umweltschonende Energiequellen, insb. Solar- und Windenergie in Verbindung mit Flexibilitätsoptionen.

Angesichts jüngerer Entwicklungen, auf die detaillierter im folgenden Kapitel eingegangen wird, erscheinen Nutzen aus benachbarten, aber nicht energetischen Produkten, wahrscheinlicher und auch kurzfristig relevant. Hier sind insbesondere die Materialforschung, Magnet- und Lasertechnik sowie Anwendungen im Gesundheitswesen zu nennen. Bereits heute erscheinen die in diesen Gebieten erzielten Fortschritte als der eigentliche Nutzen aus der Grundlagenforschung, wobei der direkte Zusammenhang unklar (und auch oftmals nicht intendiert) ist. Durch die Dynamik von privatwirtschaftlich aufgestellten Unternehmen wird die Suche nach diesen kurzfristig kommerzialisierbaren Ko-Benefits noch intensivieren (Wimmers et al., 2025; Dering, Wimmers, Böse, et al., 2026).

#### **3.3.4.2 Externe Kosten**

Aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive sind vor allem die von der Kernfusions- und Energiewirtschaft nicht selber getragenen Kosten relevant, die als „externe“ Kosten bezeichnet werden können. Die wesentlichen Kosten sind die seit den 1950er Jahren kumulierten staatlichen Finanzierungen von Forschungs- und Entwicklung, Demonstrationsprojekten, etc., welche überwiegend in eigens geschaffenen öffentlichen Großforschungseinrichtungen geflossen sind. Die Ermittlung genauer Zahlen über diese langen Zeiträume ist schwierig. Jedoch ist eindeutig, dass in der Vergangenheit die Kerntechnik, die mit Abstand am stärksten geförderte Energieform war (Dering, Wimmers, Böse, et al., 2026, S. 109) (Abbildung 12). Selbst wenn die Verteilung zwischen Kernfusion und Kernspaltung variiert, handelt es sich immer noch um drei- bis vierstelliger USD-Milliardensummern, und mit weitem Abstand vor anderen Energieträgern.

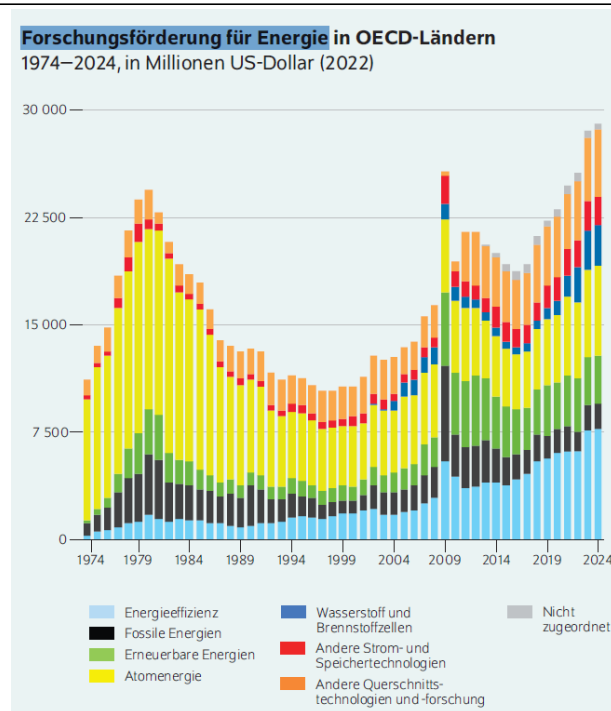


Abbildung 12: Forschungsaufwendungen für Atomenergie im Verhältnis zu anderen

Quelle: (Dering, Wimmers, Böse, et al., 2026, S. 109), auf der Basis von IEA Energy Technology RD&D Budgets Data Explorer.

Über andere externe Kosten wird weniger gesprochen, jedoch sind diese für die gesamtwirtschaftliche Betrachtung durchaus relevant. Erfahrungen mit Altlasten in anderen Sektoren (wie Kernspaltungskraftwerke oder Kohletagebaue) legen nahe, dass der Rückbau und die Entsorgung radioaktiver und anderer Abfälle nach der Beendigung der kommerziellen Nutzung der Kernfusion beim Staat landen dürften. Prominentes Beispiel ist die Kernspaltung (Hirschhausen & Wimmers, 2023; Wimmers et al., 2023), darüber hinaus gibt es viele Beispiele aus dem Braunkohletagebau, der Steinkohle und die Sondermülldeponie in Herfa-Neurode, das weltweit größtes unterirdisches Endlager für Sonder- und Industrieabfälle. Die negativen Erfahrungen lassen auch wesentlich längere Zeit dauern für Rückbau und Entsorgung erwarten, als heute diskutiert werden, im Bereich über 100 Jahre.<sup>19</sup> Wie die Finanzierung und Durchführung dieser Zwischen- und Endlagerprozesse erfolgen soll ist aus heutiger Perspektive völlig unklar.

Last but not least ist auch die Gefahr der Proliferation radioaktiven Spaltmaterials jenseits der kommerziellen Nutzung ein von der Gesellschaft zu tragendes externes Risiko (s. oben Kapitel 2). Analog zur Kernspaltung besteht auch bei den meisten Kernfusionsreaktorarten die

<sup>19</sup> Nach Gonzalez de Vicente et al. (2022) können Verunreinigungen mit Spurenelementen die Radioaktivität von Materialien entscheidend beeinflussen: So führt beispielsweise ein Niobgehalt im Bereich von 1 ppm im Stahl bereits dazu, dass Abfälle als nach US-Klassifikation als hochradioaktiv eingestuft werden müssten. Für den DEMO-Demonstrationsreaktor, der (noch) für die zweite Hälfte des Jahrhunderts geplant wird, sehen die Autoren nach 20 Jahren Betrieb eine Abklingzeit von ca. 1000 Jahren vor.

Möglichkeit, schnelle Neutronen im Blanket zum Beschuss von z.B. Uran-238 zu nutzen und somit waffenfähiges Plutonium zu produzieren. Auch für die Abzweigung des radioaktiven Tritiums aus dem Brutblanket und dessen Missbrauch steht die D-T-Kernfusion als „ideales Reservoir“ bereit (Englert & Kopp, 2024, S. 18).

Im Ergebnis spricht sehr wenig dafür, dass die negative betriebs- und energiewirtschaftliche Analyse durch eine übermäßig positive gesamtwirtschaftliche Betrachtung umgedreht werden würde.

### **3.4 Ausdruck unerfüllter Erwartungen: Die „Fusionskonstante“**

Wie geht man in einer sehr personen- und kapitalintensiven Industrie damit um, dass die Umsetzung der angekündigten energiewirtschaftlichen Umsetzung sich systematisch und ohne absehbare Lösungen seit 1951 systematisch verschiebt? Und dass der Komplex der Kernfusion „mehr von Spekulationen als von Realitäten“ lebt (Radkau, 1983, S. 68)? Und wie wird diese Thematik innerhalb der Gesellschaft reflektiert, die – wie unten gezeigt wird – mehr öffentliche Forschungsgelder in die Kernfusion gesteckt hat als in irgendeine andere Technologie?

Innerhalb der Industrie gibt es, je nach Akteurslage, den Rekurs auf die Durchsetzung des Narrativs der „baldigen Lösung wichtiger Energiefragen“, welche insb. von den seit den 1940er Jahren entwickelten Großforschungseinrichtungen bemüht wurde, der sich die Politik überwiegend angeschlossen hat. Aus diesem vormals als Aufmunterung gedachten Konstruktion ist die „Fusionskonstante“ geboren, die heute eher mit bleierner Schwere über der Kernfusions-Community hängt.

#### **3.4.1 Die „Fusionskonstante“ von mehreren Jahrzehnten**

Die seit den 1950er Jahren bestehende Kluft zwischen dem „Traum“ von der kontrollierten Kernfusion auf der Erde und den ungelösten natur- ingenieur- und energiewirtschaftlichen Herausforderungen haben sich seit 1955 in Form der „Fusionskonstante“ in die Gesellschaft eingemeißelt und prägen das Bild der Kernfusion sowohl innerhalb der Community als auch im Rest der Gesellschaft. Dabei handelt es sich um die gebetsmühlenartig wiederholten Behauptungen, eine kommerzielle energetische Nutzung der Kernfusion würde in den nächsten Jahrzehnten zur Verfügung stehen; bis dahin müsse man nur noch „ganz rasch“ ein paar grundsätzliche Fragen klären und eine ingenieurtechnische Umsetzung sicherstellen.

Tatsächlich hat sich seit den ersten militärisch motivierten Kernfusions-Versuchen in den frühen 1950er Jahren die Vorstellung erhalten, mit dieser Technologie in naher Zukunft auch einen Durchbruch für eine Energieversorgung zu erzielen. Seit dieser Zeit haben Expertinnen und Wissenschaftlerinnen immer wieder eine baldige Kommerzialisierung der Kernfusion zur Energieproduktion erwartet, bei der innerhalb von wenigen Jahrzehnten ein Fusionskraftwerk kommerziell verfügbar werden würde. Diese Kommerzialisierung ist jedoch bis heute ausgeblieben, sodass jene Schätzungen sich immer weiter in die Zukunft verschieben mussten. Der Begriff der

„Fusionskonstante“ ist seit den 1950er Jahren in der Luft und ist dann spätestens mit den gebetsmühlenartigen Vorhersagen des ITER-DEMO Programms, d.h. den 1980er Jahren, auch im Volksmund angekommen: Die kommerzielle Verfügbarkeit von Fusionskraftwerken ist nahe, sie erfolgt ... in wenigen Jahrzehnten. Dabei spielt die Anzahl der Jahrzehnte für dieses Konzept keine bedeutende Rolle, handelt es sich doch offensichtlich um eine völlig willkürlich gewählte Zeitspanne (genau genommen ist es daher keine „Konstante“, sondern eine stochastische Variable, die im Bereich 1 bis 5 (Jahrzehnte) variiert).<sup>20</sup> Die „Fusionskonstante“ ist gleichsam der Schlüssel zum Verständnis der (ausgebliebenen) Dynamik des Sektors und wird daher im Folgenden genauer ausgeführt.

### **3.4.2 Die „Fusionskonstante“ in unterschiedlichen Perioden**

#### **3.4.2.1 Die frühen Jahre...**

Die Fusionskonstante hat ihren Ursprung in der Zeit nach dem zweiten Weltkrieg und der latenten Konkurrenz zwischen Kernspaltung und Kernfusion, welche seit dieser Zeit das Atomzeitalter geprägt hat. Bereits Edward Teller, Stan Ulam und Hans Bethe waren durch das Project Manhattan und ihre eigenen Forschungsarbeiten auf Ideen der kommerziellen Nutzung von Kernfusion gekommen. Jedoch zog die Forschungspolitik nach 1945 die kommerzielle Nutzung der Kernspaltung vor (Daniels, 1944; Putnam, 1953), während dennoch an der Entwicklung der Kernfusion – und eines eigens dafür geschaffenen Forschungsdisziplin, der Plasmaphysik – gearbeitet wurde.

Die erste international beobachtbare Äußerung, und damit gleichsam die „Mutter“ des Konzepts der Fusionskonstante, erfolgte am 20. August 1955 durch den Leiter der indischen Delegation bei der ersten Konferenz zur kommerziellen Nutzung der Kernenergie in Genf, Professor Homi Babha. Diese war zwar fast ausschließlich der Kernspaltung gewidmet, hatte jedoch trotz erheblicher Hoffnungen keine fassbaren Ergebnisse gezeitigt. So drehte Professor Babha bei der abschließenden Pressekonferenz den Spieß kurzerhand herum und erklärte, eine Lösung des Energieproblems liege in der Kernfusion, welche in ca. 20 Jahren kommerziell verfügbar wäre (Radkau, 1983, S. 67).<sup>21</sup>

Seitdem ist das Konzept der Fusionskonstante in der Welt. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Community sich gerade auf eine, zwei oder auch vier Jahrzehnte versteift. So schlug der erste Direktor von EURATOM, Professor Angelopoulos, den Inder Babha noch, indem er noch im Jahr 1955 die Nutzung der Kernfusion bereits in 10 Jahren ankündigte. Der Technikhistoriker Joachim Radkau (1983, S. 68) stellte bereits 1983 mit leicht satirischem Unterton fest, dass demgegenüber

---

<sup>20</sup> Vgl. auch (Buschner et al., 2026; Takeda et al., 2023).

<sup>21</sup> Radkau (1983, S. 68): „Je mehr sich die Pläne für Kernspaltungsreaktoren [in den 1950er Jahren, zugefügt] materialisierten, desto mehr wurde es bei den Atominteressenten üblich, in der Fusion eine Konkurrenz zu sehen: Zwar keine Konkurrenz in der ökonomischen Realität, aber doch in den Zukunftserwartungen – und der Nuklearkomplex lebte ja mehr von Spekulationen als von Realitäten.“

die vier Dekaden, die der „Erfinder“ der Wasserstoffbombe, Edward Teller zu dieser Zeit in den Raum stellte, schon als pessimistisch gegolten haben mussten. Später befürchtete Teller sogar, dass die kontrollierte Kernfusion im 20. Jahrhundert nicht erreichbar sei, insb. aufgrund der Unberechenbarkeit der Plasmen („if it's plasma, it will not work“).

#### **3.4.2.2 ... über die 1970er Jahre...**

Eine besonders originelle Form der Fusionskonstante wurde am International Institute for Applied System Analysis (IIASA), einem internationalen Think Tank mit einer starken geopolitischen Bedeutung, Mitte der 1970er Jahre, gepflegt. Am „neutralen“ Standort Laxenburg bei Wien kamen Forschende aus den USA, der Sowjetunion und vielen andern Staaten dieser Blöcke sowie des globalen Südens zusammen, um zu Fragen nachhaltiger Entwicklung zu forschen und Politikberatung zu betreiben. Aufgrund der Historie der Organisation und der Besetzung der Energiesystemanalyse in den 1970er Jahren war das IIASA stark von einer „Transition“ von fossilen zu nuklearen Energieträgern geprägt und sah in der Atomenergie einen Schlüssel zur Bekämpfung eines entstehenden Klimaproblems (Fressoz, 2025, Kapitel 10).

In Bezug auf die Kernfusion ist die Substitutions-Energiesystemanalyse von Caesare Marchetti und Nebojsa Nakicenovic aus derselben Gruppe am IIASA in die Geschichte eingegangen, welche Anfang der 1970er Jahre den Durchbruch der Kernfusion für das Jahr 2025 vorhersagte (Abbildung 13, SOLFUS steht dabei im Verständnis des Autors für Kernfusion<sup>22</sup>). Diese baut auf der vereinfachten Annahme der schrittweisen Substitution von Energieträgern im Lauf von Jahrzehnten bzw. sogar Jahrhunderten auf: Kohle ersetzt Holz, Erdöl ersetzt Kohle, Erdgas ersetzt Erdöl, Kernspaltung ersetzt Erdgas und ... Kernfusion ersetzt Kernspaltung. Der Vektor dieser letzten Substitution ist die Wasserstoffwirtschaft, innerhalb derer keine fossilen Energieträger mehr notwendig sind und welche durch Kernfusion günstig zu betreiben sei (Marchetti, 1974, 1976). Marchetti und Kollegen nehmen an, dass durch wenige, aber sehr große Kernfusionsanlagen, die aus technischen Gründen in die Ozeane platziert werden („Fusion Islands“), der Energieverbrauch der gesamten Weltbevölkerung gedeckt werden könne. Somit ergibt sich ab dem Jahr 2025 ein stark steigender Anteil der Kernfusion am Energiemix, der mit dem vorhergesagten Rückgang der Kernspaltung sogar in Richtung 100% laufen würde.

---

<sup>22</sup> SOLFUS könnte dabei für eine kostengünstige Technologie, die Solarenergie oder die Kernfusion. Somit könnte die Entwicklung theoretisch auch auf Solarenergie zulaufen. Dies wird jedoch bei der Diskussion der Wasserstoffwirtschaft mit Bezug auf angeblich sehr hohe Kosten der Solarenergie verworfen („I'll send them to the gym.“), wodurch SolFus bei Marchetti eben doch „nur“ für Kernfusion steht.

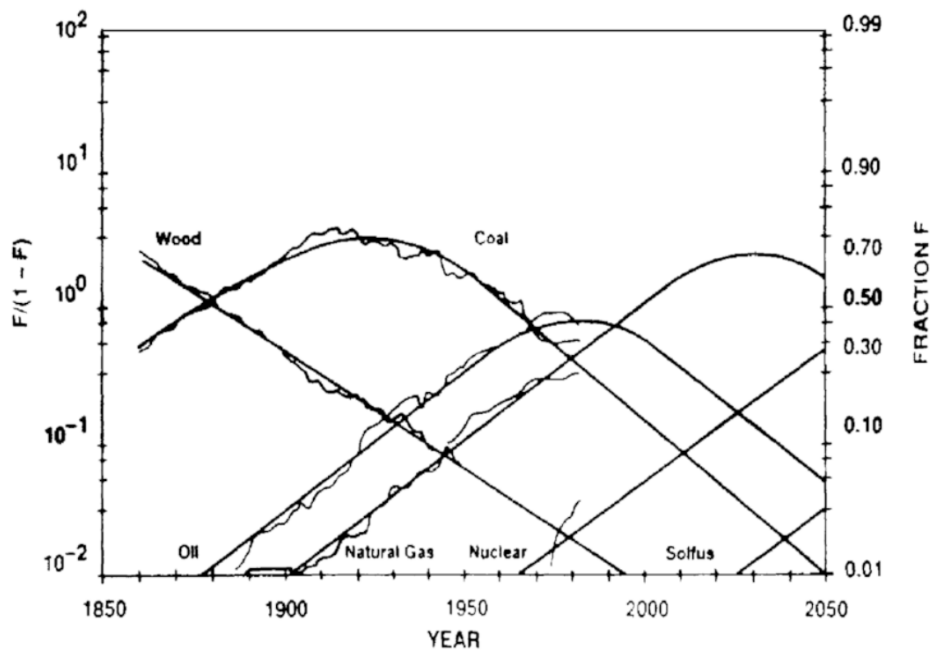


Abbildung 13: Die Substitutionsdynamik der Primärenergieträger und die Verbreitung der Kernfusion ab 2025 nach Marchetti

Quelle: (Marchetti & Nakicenovic, 1979).

### 3.4.2.3 ... bis zur Gegenwart

Durch die Renaissance des Traums von der kontrollierten Kernfusion auf der Erde ist auch die Fusionskonstante wieder in die Diskussion aufgenommen worden. So stellte die deutsche Forschungsministerin Stark-Watzinger im Herbst 2022 im Nachgang der Meldung der ersten Trägheitsfusion mit angeblich positivem Energiegewinn im Dezember 2022 einen Horizont von einem Jahrzehnt in Aussicht, bis zu dem auch Deutschland über einen kommerziellen Kernfusionsreaktor verfügen würde.<sup>23</sup> Bundeskanzler Friedrich Merz ging noch einen Schritt weiter und erklärte 2026 die Windenergie als eine „Übergangstechnologie“, die lediglich benötigt würde, „bis Deutschland den ersten Fusionsreaktor der Welt ans Netz nimmt; das kann zehn oder zwanzig Jahre dauern.“<sup>24</sup>

Traditionelle Großforschungseinrichtungen verdanken ihre Existenz der Fusionskonstante und lassen keine Gelegenheit aus, auf den Bedarf der Forschung für eben diese kommenden

<sup>23</sup> Heute-journal vom 13. Dezember 2023; [www.zdf.de/nachrichten/heute-journal/kernfusion-bundesforschungsministerin-watzinger-100.html](http://www.zdf.de/nachrichten/heute-journal/kernfusion-bundesforschungsministerin-watzinger-100.html). Weitere Stickpunkte: „verlässlich, klimaneutral die Sonne auf die Erde zu holen. ... Technologieoffen die großen Herausforderungen meistern. Werden schnell Fortschritte sehen können. Zukunftsenergien, und dazu gehört die Kernfusion. ...Möglichkeit eröffnen für die Start-Ups. ... Forschung ist eine staatliche Aufgabe. „Wann wird das erste deutsche Fusionskraftwerk ans Netz gehen?“: „Also das ist ja unser Sunshot Projekt, diese Kernfusion, weil wir dann eben schaffen, Energie als Basis für den Wohlstand verlässlich und günstig auch zur Verfügung zu stellen. Insofern, die Ambitionen dürfen da nicht zu klein sein, ich sag 10 Jahre, es kann auch etwas länger dauern, aber wir müssen uns die Ambitionen ja setzen.“ (Minute 2:50).

<sup>24</sup> Bundeskanzler Friedrich Merz am 26. Januar 2026 beim Nordsee-Gipfel in Hamburg. Phoenix vor Ort, <https://youtu.be/PA6hozcgF-c>, ab circa 15:21.

Jahrzehnte zu pochen. Dagegen ignorieren private kofinanzierte New Ventures das Konzept und unterlaufen es vorsätzlich, um ambitioniertere Ziele innerhalb der nächsten 10-15 Jahre zu plausibilisieren. Der zunehmende Konflikt zwischen den Stakeholdern mit sehr unterschiedlichen Strukturen und Anreizen wird im nächsten Kapitel ausgeführt.

### 3.4.3 Die „Fusionskonstante“ in Datenpunkten

Die Komik-Tragik der Fusionskonstante liegt in ihrer absoluten Willkürlichkeit, welche durch keinerlei objektiv nachvollziehbare Prognostik gestützt wird. Langzeitanalysen der Fusionskonstante sind somit auch in der empirischen Forschung zur Technikgeschichte zu einem beliebten Thema geworden. So analysiert der japanische Physiker Shutaro Takeda (2023) 33 Aufsätze in den Jahren 1985-2022. Die Arbeit überprüft veröffentlichte Schätzungen darauf, wann Kernfusionsenergie praktisch realisiert werden kann: Die aktuellen gemeinsamen Erwartungen liegen bei etwa 18 Jahren bis zur ersten netzgekoppelten Kernfusion.

Eine von unserer Forschungsgruppe initiierte Literaturrecherche, die 67 wissenschaftliche Publikationen von 1956 bis 2024 untersuchte, legt nahe, dass sich die erwarteten Horizonte zwar über die Zeit verschieben, jedoch in der langen Frist nicht eindeutig rückläufig sind (Abbildung 14). Dabei wurde die Literatur nach der vorhergesagten technischen (in Abbildung 14 blau gekennzeichnet) als auch der kommerziellen Durchsetzung der Kernfusion (in Abbildung 14 orange gekennzeichnet) gesichtet. Die Analyse zeigt, dass die Erwartungen an eine technische Machbarkeit von Fusionsenergie optimistischer sind als die tatsächlich zu erwartende kommerzielle Verfügbarkeit. Darüber hinaus fällt die starke Streuung der Prognosezeiträume auf.<sup>25</sup>

Bei einem Vergleich der Mittelwerte (Mediane) ist zu erkennen, dass die rein technische Umsetzung der Kernfusion (Betrieb eines Demonstrationskraftwerks) im Mittel circa zehn Jahre vor seiner kommerziellen Nutzung erwartet wird. Obwohl man vermuten könnte, dass die prognostizierten Zeiträume mit der fortschreitenden Forschung abnehmen, lässt sich dies durch die erhobenen Daten nicht bestätigen. Die Prognosezeiträume für Demonstrationskraftwerke wie auch für die kommerzielle Verfügbarkeit der Kernfusion werden im Mittel über den Beobachtungszeitraum nicht kleiner. Prognosen, die nach 2000 veröffentlicht wurden, gehen weiterhin von einem Zeitraum von etwas mehr als 24 Jahren bis zur Verfügbarkeit eines Demonstrationskraftwerks und von 40 Jahren bis zur kommerziellen Verfügbarkeit der Kernfusion aus. Dies entspricht dem Doppelten der 1955 vom indischen Prof. Bhabha getätigten Vorhersage.

---

<sup>25</sup> Siehe (Buschner et al., 2026) bzw. eine Zusammenfassung bei (Wimmers et al., 2025, S. 197).

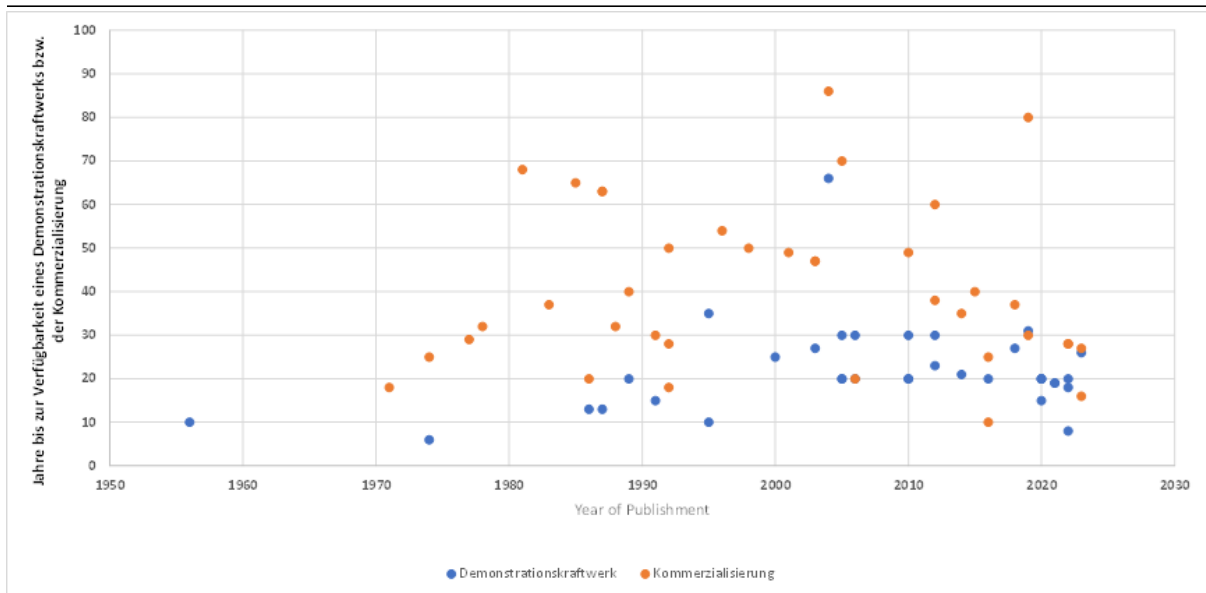


Abbildung 14: Erwartungen an die Durchsetzung der Kernfusion in den kommenden Jahrzehnten („Fusionskonstante“)

Quelle: Eigene Darstellung

## **4 Neue Dynamiken: Öffentliche Großforschung und privatwirtschaftliche New Ventures**

Dieses Kapitel analysiert strukturelle Trends in Governance und Finanzierung in der Kernfusion und arbeitet dabei Veränderungen sowohl organisatorischer als auch technologischer Art heraus; darüber hinaus werden ordnungspolitischen Herausforderungen („Public Policy“) diskutiert, insb. die aus aktuellen Entwicklungen abgeleiteten Herausforderungen für die öffentliche F&E-Politik an der Schnittstelle von Grundlagen- und Anwendungsforschung. Dabei gehen wir auch auf einige repräsentative Fallbeispiele von traditionellen und neueren Unternehmensstrukturen ein. Eingangs werden die Organisationsformen miteinander verglichen, insb. traditionelle Großforschungseinrichtungen mit öffentlicher Finanzierung („Big Science“) und privat kofinanzierte, kommerzielle Unternehmen („New Venture“). Letztere weisen eine hohe technische und finanzielle Dynamik, auf, die allerdings die grundlegende Herausforderung, wettbewerbsfähige Energie zu produzieren, auf absehbarer Zeit auch nicht wird lösen können. Danach wird die Thematik anhand von konkreten Fallstudien erläutert: Darunter fallen neben der Großforschung wie der Joint European Torus (JET) und die US National Ignition Facility (NIF) und das deutsche Vorzeigeprojekt Wendelstein 7-X auch hervorstechende Privatunternehmen wie Commonwealth Fusion Systems (CFS), die Type One Energy Group (TOE), Helion Energy (HE) sowie der deutsch-US-amerikanischen Unternehmung Focused Energy.

### **4.1 Governance-Strukturen im Wandel: „Big Science“ und „New Ventures“<sup>26</sup>**

#### **4.1.1 Großforschungseinrichtungen mit öffentlicher Finanzierung („Big Science“) ...**

Sowohl in den USA als auch in anderen Ländern war Kernfusion seit dem Zweiten Weltkrieg vor allem in Großforschungseinrichtungen organisiert. Diese als „Big Science“ bezeichneten Strukturen beinhalteten Grundlagenforschung, Labore und auch Zusammenarbeit mit der Industrie, allerdings fast ausschließlich öffentlich finanziert. Im Gegensatz zu verteilter Forschung und dem Universitätssystem entwickelten sich dabei, auf der Grundlage der Großforschungsstrukturen des Project Manhattan, Institute mit vier- bzw. sogar fünf-stelligen Mitarbeitendenzahlen. Jenseits konkreter und mit starker politischer Priorität versehender Missionen, wie die Atom-bombe oder der spätere „Moonshot“ von US-Präsident Kennedy ergaben sich dabei automatisch Probleme der Steuerung und der Flexibilität bei der Anpassung von Forschungsmitteln.<sup>27</sup>

---

<sup>26</sup> Dieser Abschnitt bezieht sich auf (Wimmers et al., 2025).

<sup>27</sup> Vgl. Big Science, Innovation, and Societal Contributions (1 ed.), Oxford University Press Oxford, pp. 56–87, doi:10.1093/oso/9780198881193.003.0004, ISBN 978-0-19-888119-3, Vgl. Auch die spezifischen Erfahrungen des Leiters eines der größten post-Project Manhattan Institut, Alvin M. Weinberg, langjähriger Direktor des Oak Ridge National Laboratory, nach Stefan Theil, "Trouble in Mind: Two years in, a \$1-billion-plus effort to simulate the human brain is in disarray. Was it poor management or is something fundamentally wrong with Big Science?", Scientific American, vol. 313, no. 4 (October 2015), p. 38.

Aufbauend auf Kernfusionsforschung im Project Manhattan wurde in der Nachkriegszeit sowohl an militärischen als auch – später – an kommerziellen Anwendungen der Kernfusion geforscht. Weltweit führend diesbezüglich waren von Anfang an die USA: Neben der militärischen Waffenforschung hatte das Projekt Matterhorn B in den USA einen zweiten Forschungsstrang, welcher sich auf die Entwicklung eines Reaktorkonzepts mit magnetischem Einschluss konzentrierte: Bereits 1951 wurde an der Princeton University ein erster Entwurf für einen „Stellertor“ präsentiert, der auf dem Prinzip des magnetischen Einschlusses beruhte.<sup>28</sup> Das Princeton Plasma Physics Lab wurde somit zur Wiege einer neuen Teilwissenschaft, der Plasmaphysik. Darüber hinaus wurde am Hauptsitz des Manhattan Projekts, dem Los Alamos National Laboratory (LANL) eine neue Abteilung für Kernfusion gegründet und in Livermore (Kalifornien) ein neues Großforschungslabor für Kernwaffen- und Fusionsforschung eingerichtet, das Lawrence Livermore National Lab (LLNL).

Auch in der Sowjetunion wurden nach dem Zweiten Weltkrieg Großforschungsanlagen für die Nutzung der Kernfusion entwickelt. Hierzu gehörten neben dem zentralen Institut für die sowjetische Atomforschung, dem Kurtschatow-Institut für Atomenergie, auch das Institut für Angewandte Mathematik der Akademie der Wissenschaften sowie das Lebedew-Institut für Physik (FIAN) (alle in Moskau). Die Sowjetunion wurde dabei in den 1950er Jahren auch führend in der nicht-militärischen Ausprägung der Magnetinduktion durch ein neues Konzept des magnetischen Einschlusses, den sogenannten Tokamak (s. Kapitel 2).

Im Kontext dieser Entwicklungen bauten auch andere Länder ihre eigenen Großforschungsinstitute auf: In Frankreich waren das z.B. das Centre d’Energie Atomique (CEA) und in Großbritannien das Atomic Energy Research Establishment (AERE, Harwell) sowie das Culham Laboratory (UKAEA Culham Centre for Fusion Energy – CCFE, beide nahe Oxford). In Deutschland wurden 1956 zwei Kernforschungszentren gegründet, eines in Karlsruhe und eines in Jülich, darüber hinaus 1960 ein auf Kernfusion fokussiertes Institut für Plasmaphysik (IPP). In den Folgejahren entstanden so an diesen Großforschungseinrichtungen einige Tokamak-Experimentalanlagen, darunter der TFR (1973, Frankreich), der PLT (1975, USA), der TFTR (1982, USA), der JET (1983, Großbritannien) und der JT-60 (1985, Japan). Das IPP verband Grundlagenforschung mit der Entwicklung von experimentellen Magneteinschluss-Anlagen, von denen noch zwei in Betrieb sind: Der ASDEX-Upgrade (als Tokamak) in München-Garching sowie der Wendelstein als Stellarator, vormals mehrere Jahrzehnte in Garching und heute als Nr. 7-X in Greifswald. An der Kernforschungsanlage Jülich wurde im Rahmen einer internationalen Kooperation ein Experimental-Tokamak Reaktor mit geringer Leistung entwickelt, der sogenannte TEXTOR (Toroidal EXperiment for Technology Oriented Research), an welchem Voruntersuchungen zu Plasma-

---

<sup>28</sup> Vgl. (Post, 1956) sowie (Bickerton et al., 1999).

Wand Wechselwirkungen und lokale Plasmaheizverfahren durchgeführt wurden (2013 stillgelegt). Das Kernforschungszentrum Karlsruhe legte einen Schwerpunkt in den Bereichen Supraleitende Magnete, Heizsysteme und D-T-Brennstoffkreislauf sowie später der geplanten beschleunigerbasierten Neutronenquelle IFMIF (international Fusion Materials Irradiation Facility) (Helmholtz Gemeinschaft u. a. 2006). Alle drei Großforschungseinrichtungen waren und sind auch heute noch in die Arbeiten des ITER und des geplanten DEMO einbezogen.

Zeitgleich zu den Entwicklungen des magnetischen Einschlusses wurde die Forschung von Fusionskonzepten mit Trägheitseinschluss forciert, immer noch in den Großforschungseinrichtungen. Frühe Forschungsvorhaben des US-Verteidigungsministeriums in den 1950er und 1960er Jahren zeigten die Herausforderungen in der Bereitstellung ausreichend energiereicher Laser sowie der Entwicklung der sogenannten „Targets“, die mit den Lasern beschossen werden, um eine Fusionsreaktion zu zünden. Mit der Weiterentwicklung von Lasertechnologien und der Einführung des sog. „Science Base Stockpile Stewardship“-Programms (1994), welches den Erhalt und die Modernisierung der US-Amerikanischen Kernwaffen zum Ziel hatte, intensivierten sich die Forschungsarbeiten in der Trägheitsfusion an der „National Ignition Facility“ (NIF) innerhalb des Lawrence Livermore National Labs.<sup>29</sup>

#### 4.1.1.1 Erfolge, aber auch erhebliche Verzögerungen

Die Bilanz eines halben Jahrhunderts Großforschungseinrichtungen, d.h. von den 1990er Jahren bis um die Jahrhundertwende, waren durchwachsen und in Bezug auf das öffentlich dargestellte Ziel („nachhaltige Energieerzeugung“) de facto vernachlässigbar. Zwar ging die Grundlagenforschung in den Großforschungseinrichtungen entsprechend der oftmals auf Jahrzehnte angelegten Programmen voran und zeitigte einige Erfolge. So wurden in dem Rahmen Experimentalreaktoren entwickelt, insb. der Tokamak mit Magneteinschluss. Viele Anlagen verbesserten auch ihre Outputparameter, wie Einschlusszeit und Triple-Produkt. Insbesondere näherten sich einige Experimentalanlagen dem sogenannten „scientific breakeven“ an, jener Schwelle, an der die Energieausbeute aus der Kernfusion größer ist als die Energie, die für das Auslösen der Reaktion notwendig war ( $Q > 1$ ). Echte Durchbrüche auf dem Weg zur kontrollierten Kernfusion auf der Erde sind jedoch nicht erfolgt.

Darüber hinaus waren und sind fast alle großen Pilotprojekte der Großforschungseinrichtungen verzögert, viele davon erheblich. Ein typisches Beispiel für ein Großprojekt mit gewissen technischen Fortschritten ist der Joint European Torus (JET), der nach ersten Erfolgen ein

---

<sup>29</sup> S. Drell, C. Callan, D. Eardley, J. Goodman, D. Hammer und W. Happer (1994): Science Based Stockpile Stewardship. Defense Technical Information Center. Technical Report No. ADA286395 sowie MacCracken und Stott, a.a.O. Im Dezember 2022 sorgte genau dieses Kernwaffenforschungsinstitut („NIF“) für weltweite Aufmerksamkeit, als die Anlage als erste weltweit das „scientific breakeven“ erreichte. Es wurde also erstmals mehr Energie durch eine Fusionsreaktion freigesetzt, als für die Zündung notwendig gewesen war. Allerdings berücksichtigte diese Energiebilanz nicht die notwendige Energie für den Betrieb der Laser und anderer Komponenten und gelang nur für einen einzigen sogenannten Puls (Kramer, 2023).

unrühmliches Ende gefunden hat. Nach dem Austritt Großbritanniens aus dem EU- und dem EURATOM-Vertrag wurde die Anlage 2023 geschlossen und abgebaut. Systematische Verzögerungen und unkontrollierte Kostensteigerungen sind anhand der vormaligen Vorzeigeprojekte der internationalen Kernfusionsforschung besonders einschlägig, dem International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) und dem geplanten Nachfolgeprojekt eines Kraftwerksdemonstrators (DEMO) (vgl. Kapitel 2). Am Standort Cadarache in Südfrankreich sollte, der Planung von 1993 entsprechend, bereits im Jahr 2005 eine Versuchsanlage und in den 2020er Jahren ein Demonstrationskraftwerk (DEMO) in Betrieb gehen. Der Experimentalreaktor sollte als nächste Stufe wichtige Komponenten testen sowie Prozesse theoretisch vertiefen, die für ein zukünftiges Kernfusionskraftwerk notwendig sind, wie z.B. das Erbrüten von Tritium.

Das ITER-Projekt stand von Anfang an, und bis heute, unter einem unglücklichen Stern. Bahnbrechende Ergebnisse der Grundlagenforschung zur Entwicklung eines kommerziell erfolgreichen Fusionskraftwerks in einem hochkomplexen Team von 27 Mitgliedsstaaten, die darüber hinaus sowohl in der Kerntechnik als auch in anderen Bereichen in Wettbewerb miteinander standen bzw. stehen, sind nicht erfolgt. Seit den 1990er Jahren fügen sich Projektverzögerungen, Teil-Ausstiege wichtiger Geberländer sowie beliebig hohe Kostensteigerungen aneinander. In den 1990er Jahren wurde die Finanzierung des Projekts insb. von Russland, Japan und den USA reduziert und die USA stiegen zwischenzeitlich aus dem Projekt aus. Mit dem Beitritt Chinas, Indiens und Südkoreas bis 2005 traten auch die USA wieder bei und das Projekt gewann wieder an Fahrt. Das Ziel beim (bereits erheblich verzögerten) Baubeginn im Jahr 2007 war der Beginn der Plasmaexperimente im Jahr 2016. Inzwischen geht man davon aus, dass die Deuterium-Tritium-Fusion nicht vor 2039 erfolgen kann. Die Zeitverzögerungen sowie erhebliche Veränderungen im Design führten zu erheblichen Kostensteigerungen. Ausgehend von einer initialen Kostenschätzung von € 5 Mrd. wird inzwischen von € 20 Mrd., teilweise wird sogar von über € 50 Mrd. gesprochen.

Bei nüchterner Betrachtung muss man den ITER als ein gescheitertes Projekt bezeichnen. Die komplexe Projektstruktur, die zurückhaltende Beteiligung vieler beteiligter Länder sowie die zunehmende Re-Nationalisierung von Kernfusionsprogrammen lassen für die Zukunft keine signifikanten Fortschritte erwarten. Im Gegenteil: Zunehmende geopolitische Konflikte zwischen den Hauptbeteiligten, u.a. den USA, der Europäischen Union, Russland und China bedrohen sogar die schiere Existenz des Projekts. Bereits 2002 stellte das „Büro für Technikfolgenabschätzung am Bundestag“ eine Neuausrichtung der Kernfusionsforschung in den Raum, bei der die Weiterentwicklung von Tokamakkonzepten aktiv beendet werden könnte (Grunwald u. a. 2002, 12). Diese Option ist heute, weitere 25 Jahre später und nach fortlaufenden Verzögerungen umso dringender abzuwägen.

Und der DEMONstrator? Das ITER-Projekt ist ein reines Forschungsprojekt, bei dem unter anderem die Funktionsfähigkeit der supraleitenden Magnete, das Verhalten des Plasmas sowie das Erbrüten von Tritium untersucht werden sollen. Es ist deshalb nicht dazu geeignet, die technische Umsetzung der kontrollierten Fusion mittels magnetischen Einschluss zur Stromproduktion zu demonstrieren. Erst das Nachfolgeprojekt „DEMO“ sollte eine Demonstrationsanlage darstellen, bei der Kernfusion und Stromproduktion inklusive des erforderlichen Tritium-Brütens im Betrieb gezeigt werden sollte. Frühere Planungen gingen von einer Betriebsphase ab 2020 aus, inzwischen ist dies auf die zweite Jahrhunderthälfte verschoben worden. Insgesamt ist es um den DEMO in den vergangenen Jahren sehr ruhig geworden. Die Saga des ITER, den Kritiker mit dem Turmbau zu Babel gleichsetzen, ist beliebig vertiefbar.

#### **4.1.2 ...und privat kofinanzierte kommerzielle Unternehmen („New Ventures“)**

Die strukturellen Probleme der Großforschungseinrichtungen sowie der sich ausweitende Markt für Unternehmens- und Start-Up-Finanzierung haben seit den 2010er Jahren zu einer neuen Kategorie, privat kofinanzierte kommerziellen Unternehmen, geführt, in der Literatur oftmals als „New Ventures“ bezeichnet. Dabei handelt es sich sowohl um Ausgründungen aus den Großforschungseinrichtungen und Universitäten wie z.B. Focused Energy und Proxima Fusion in Deutschland, als auch um ex-nihilo geschaffene neue Unternehmensstrukturen. Diese Unternehmen sind i.d.R. agil und übernehmen sowohl Forschungs- als auch vor allem Anwendungstätigkeiten. Die Ventures setzen sowohl die klassischen Großforschungseinrichtungen als auch die staatliche Innovationspolitik unter Druck, indem sie extrem ambitionierte Ziele für kommerzielle Kernfusionsreaktoren ankündigen, die meisten innerhalb des kommenden Jahrzehnts, viele sogar früher. Weltweit sind derzeit ca. 80 New Ventures in der Kernfusion aktiv, welche teilweise erhebliche Dynamiken aufweisen und diverse innovative Reaktorkonzepte verfolgen (W. Nuttall et al., 2025; Steigerwald et al., 2026). Dabei dominiert nach wie vor der Magneteinschluss, allerdings gibt es auch zunehmend New Ventures mit einem Fokus auf Trägheitsfusion (u.a. zwei der vier deutschen New Ventures).

##### **4.1.2.1 Finanzierung, Eigentum und Technologien**

Eine Vollerhebung aller Fusions-Ventures auf der Basis öffentlich verfügbarer Informationen zeigt die Dynamik auf. Während in den in den 1980er und 1990er Jahren die Fusionsforschung und Entwicklung in öffentlichen Forschungseinrichtungen konzentriert war, begannen seit dem Jahr 2005 erste Gründungen von privat bzw. privat-öffentlichen neuen Unternehmen, der „New Ventures“. Der Anstieg an Neugründungen ist auch davon gekennzeichnet, dass in den letzten Jahren deutlich mehr privates Kapital investiert wird, insb. seit 2013. Diese New Ventures betreiben privat ko-finanzierte Anwendungsforschung, die auf den Ergebnissen der Grundlagenforschung an Experimentalanlagen großer Forschungsinstitute aufbaut. Der Fokus liegt dabei auf

der Weiterentwicklung zentraler Schlüsselkomponenten, wie der Stärke von Magnetspulen und der Effizienz von Lasersystemen.

Die Dynamik des Sektors lässt sich auch an der Eigentumsverteilung der Fusionsanlagen ablesen, welche durch starkes Wachstum privater Beteiligungen gekennzeichnet ist. Der Anteil privater Kooperationspartner an Fusionsreaktoren und deren Finanzierung ist in den vergangenen Jahren stark angestiegen. So sind 50 der insgesamt 168 gebauten oder geplanten Reaktoren in privater Hand (IAEA 2024). Von den 168 Fusionsanlagen waren 2024 102 in Betrieb, 14 im Bau, 48 in Planung und vier wurden abgeschaltet. Aufgeteilt nach Ländern befanden sich die meisten Anlagen in Betrieb in Japan (22) und den USA (21), gefolgt von Russland (10) und China (9). In (Abbildung 19) ist die Verteilung der Anlagen nach Betriebsstatus, Finanzierungsstruktur und Anlagenkonzept zu erkennen. Die in öffentlicher Hand betriebenen Anlagen haben einen Schwerpunkt auf dem Magneteinschluss (Tokamak und Stellarator). Die in Planung befindlichen Anlagen sind vor allem privat finanziert; dort haben Trägheitskonzepte einen höheren Anteil. Die FusDIS Datenbank beinhaltet auch kleiner Anlagen mit sehr geringen Durchmessern, wie den MUSE-Forschungsreaktor an der Princeton University.

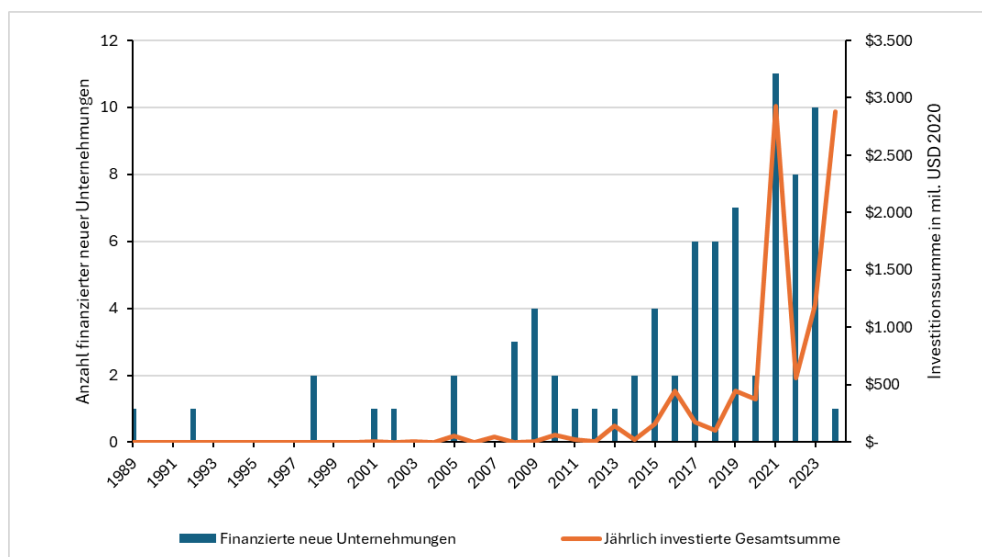


Abbildung 15: Anstieg an Finanzierung für private Ventures

Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf (Steigerwald et al., 2026, S. 402).

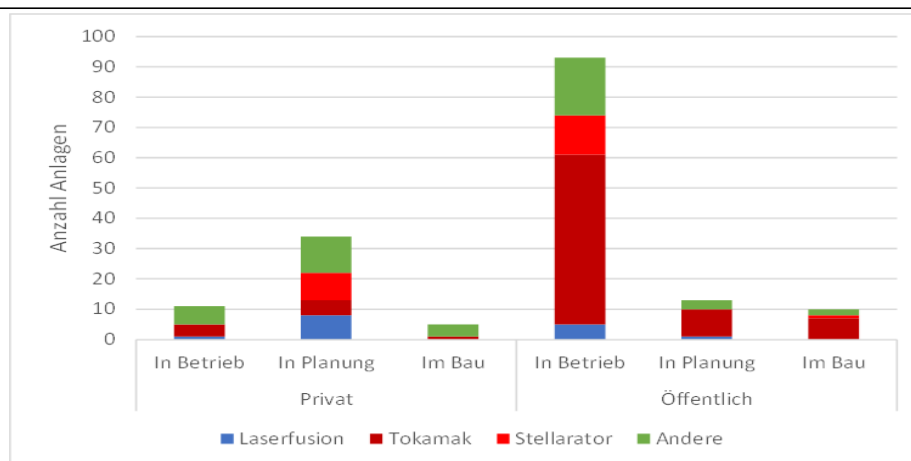


Abbildung 16: Überblick über Art und Struktur der bekannten Fusionsanlagen

Quelle: IAEA FusDIS (Stand Dezember 2024).

#### 4.1.2.2 Konflikte zwischen Großforschung und kommerziellen Unternehmen ...

Der latente Wettbewerb zwischen grundlagenorientierter Großforschung und anwendungsorientierter Industrieforschung dürfte sich in den nächsten Jahren noch verstärken. Diese Entwicklung ist normal, ist doch die Zweckbestimmung der Grundlagenforschung einer kommerziell belastbaren Anwendungslogik diametral entgegengesetzt. Großforschungseinrichtungen reagieren tendenziell konservativ und ziehen sich auf ihren ursprünglichen Auftrag in der Grundlagenforschung zurück: Analog zum ITER klaffen zwischen den angekündigten Zielen bzgl. der Umsetzung kommerzieller Kernfusion und den tatsächlichen Zeitplänen in der Großforschung zunehmende Lücken. Andererseits sind die kommerziellen Unternehmen bei der Entwicklung von energetischen Anwendungen noch auf die Experimentalinfrastruktur der Großforschungseinrichtungen angewiesen. Parallel stehen sie unter Druck, sich durch Nebentätigkeiten in nicht-energetischen Anwendungen alternative Erlösmöglichkeiten zu erarbeiten.

##### 4.1.2.2.1 ... um technologische Konzepte ...

Die obige Vollerhebung weist bereits auf eine Verschiebung der Bedeutung unterschiedlicher Technologielinien hin, die bei detaillierter Betrachtung noch deutlicher wird: Privatwirtschaftliche Unternehmen setzen tendenziell auf andere Konzepte in Bezug auf die Technologielinie, aber auch die Größe der Anlagen. Insb. hat das Scheitern der Großforschung, insb. der lange bevorzugten Tokamak-Reihe, zu einer „Renaissance“ alternativer Reaktorkonzepte geführt, welche vor allem privat kofinanzierte Anwendungsforschungsunternehmen seit ca. zwei Jahrzehnten vorantreiben. Damit ist auch das traditionelle Entwicklungsschema der Großforschungsanlagen, „big is beautiful“, existentiell herausgefordert. Traditionell ging man bei der auf Jahrzehnte angelegten Großforschungsprogrammen von einer schrittweisen Vergrößerung („Skalierung“) der Magnet-Reaktorkonzepte aus (Helmholtz Gemeinschaft u. a. 2006, 53). Bei diesem Ansatz ging es von einem kleinen Tokamak (TEXTOR, Tokamak Experiment for Technology

Oriented Research, ca. 10 m<sup>3</sup>) zum Jet der 1990er Jahre (ca. 100 m<sup>3</sup>) sowie dann – nach damaliger Planung – für 2016+ zum ITER (ca. 840 m<sup>3</sup>), welcher dann energetisch einem mittelgroßen Kohlekraftwerk entsprechen sollte, d.h. ca. 500 MW<sub>el</sub>.

Jedoch haben mit dieser Skalierung die auftretenden Probleme zu- statt abgenommen, sodass die Devise „big is beautiful“ nicht haltbar war. Daraus lernend haben private kofinanzierte New Ventures mit originellen Designs vereinfachte Reaktorkonzepte mit geringeren Volumina entwickelt. So geht das inzwischen weltweit führende Tokamak-Konzept, der von Commonwealth Fusion entwickelt wird, auf ein Plasmavolumen von lediglich ca. 150 m<sup>3</sup> zurück (ARC: „affordable – robust – compact“). Andere New Ventures haben auch lange verwaiste Reaktorkonzepte wieder hoffähig gemacht und stellen damit die Dominanz des (von Big Science entwickelten) Magneiteinschlusses in Frage.

#### 4.1.2.2.2 ... um Fördermittel und wissenschaftlichen Nachwuchs

Die derzeit noch engen Beziehungen zwischen Großforschung und New Ventures dürften sich in der Zukunft zunehmend lösen und der Wettbewerb um Fördermittel und wissenschaftlichen Nachwuchs zunehmen. Hierfür spricht auch eine analoge Dynamik der Akteursstrukturen, die man historisch bei der Entwicklung der Kernspaltungskraftwerke (KKWs) beobachten kann. Dort entwickelte sich in den 1960er Jahren in den USA, und mit etwas Zeitverzögerung auch in Frankreich, England, Deutschland und anderswo, eine zunehmende Kluft zwischen der (Grundlagen-)Forschung der „Big Science“ und den Entwicklungen industrieller Akteure in der „richtigen“, industriellen Welt: Während die Großforschungsinstitute an sogenannten „fortschrittlichen“ und komplexen (in den USA „advanced reactors“) Technologielinien arbeiteten, setzte sich die von der Industrie zeitnah und pragmatisch umgesetzte „einfache“ Technologielinie der Leichtwasserreaktoren rasch durch (Böse, 2026; Cowan, 1990). In Deutschland scheiterten beide Konzepte der Großforschungsinstitute, obwohl große Kernforschungszentren in Karlsruhe (schnelles Neutronenspektrum) bzw. Jülich (Höchsttemperatur) sich darauf spezialisiert hatten. Dem Technikhistoriker Jochen Radkau zufolge waren die Kernforschungszentren am Ende für den industriell relevanten Teil der Kerntechnik nahezu bedeutungslos<sup>30</sup>. Eine analoge Entwicklung ist derzeit auch in der Kernfusion zu beobachten und legt einen dringenden Anpassungsbedarf bei der strategischen Ausrichtung und der Förderung der Großforschungsinstitute offen.

---

<sup>30</sup> „Großforschung und Atomindustrie entwickelten sich auseinander; die Industrialisierung der Forschung führte keineswegs zu einer Identität von Forschung und Industrie. Diese Erfahrungen aus der Geschichte der Kernenergie enthält verallgemeinerbare Elemente.“ (Radkau, 2008, S. 363). S.a. (Radkau, 1983, S. Kapitel III.2 „Eigendynamik der Großforschung“, 2017, S. 4: Die Unfähigkeit zur konkreten Reaktorvision, S. 157).

## 4.2 Fallstudien: Öffentliche Großforschung und New Ventures in unterschiedlichen Technologielinien

Unterschiedliche Herangehensweisen, Zeitskalen und erwartete Ergebnisse lassen sich durch Fallstudien konkreter Kernfusionsprojekte am besten herausarbeiten. Daher werden im Folgenden acht Fallstudien vorgestellt, je eine Hälfte aus Großforschungseinrichtungen und eine Hälfte aus privaten New Ventures. Je zwei Fallstudien beziehen sich auf unterschiedliche Technologielinien: Tokamak, Stellarator, Trägheitseinschluss sowie Field-Reversed Configuration (FRC). Darüber hinaus decken die Fallstudien die relevanten der in Kapitel 2 beschriebenen Brennstoffkombinationen ab: Deuterium-Tritium (D-T), Deuterium-Helium<sub>3</sub> (D-H<sub>3</sub>) sowie Proton-Boron<sub>11</sub> (p-b<sub>11</sub>). Die Fallstudien weisen auch auf stark unterschiedliche Strategien von Big Science und New Ventures hin.<sup>31</sup>

### 4.2.1 Tokamak

#### 4.2.1.1 Joint European Torus (JET)

Der Joint European Torus (JET) ist ein frühes Beispiel für eine ambitionierte Kooperation europäischer Großforschung, welches zwar Teilerfolge in der Grundlagenforschung erzielte, aber sein bei Gründung 1973 angestrebtes Ziel, erstmals einen positiven Energiekoeffizienten ( $Q > 1$ ) zu liefern, bei seiner Schließung ein halbes Jahrhundert später nicht von Ferne erreicht hat. Als Gastgeber am Standort des Reaktors in Culham (Oxfordshire) war das Vereinigte Königreich (Großbritannien) stark bei der technischen und organisatorischen Umsetzung beteiligt. Deutschland war einer der größten Geldgeber und Forschungspartner, u.a. durch das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching, darüber hinaus waren Frankreich und Italien wichtige finanzielle und wissenschaftliche Partner, auch über enge Verbindung zum ITER-Engagement. Mit dem JET wurde der bisher größte Tokamak-Magnetfeldreaktor mit bis dahin noch nicht beforschten Hochfeld-Magneten (3,5 Tesla Feldstärke) darauf ausgelegt, Erfahrungen für den späteren ITER-Forschungsreaktor zu sammeln, u.a. in Bezug auf die Wandmaterialien (Beryllium oder Wolfram) und der Simulation der Wandbedingungen.

Tatsächlich konnten mit dem JET gewisse Erfolge erzielt werden. So erzeugte er nach der Inbetriebnahme bereits im Jahr 1983 das erste Plasma bei einer Leistung von 16 MW. 1997 erzielte eine Testfusion den technischen Weltrekord einer Energieabgabe von 69 Mégajoule für 6 Sekunden, eine für damalige Verhältnisse bemerkenswert lange Einschlusszeit: Der entsprechende Q-Faktor war immerhin 0,39. Zwar wurden in den 2000er Jahren weitere Fusionstests durchgeführt, jedoch wurden die für den JET formulierte Ziel einer Experimentalfusion mit einem Energiefaktor von  $Q > 1$  nicht erreicht.

---

<sup>31</sup> Die Fallstudien beruhen auf (Dering, 2026; Dering, Wimmers, & Von Hirschhausen, 2026) und weiterer Literatur und online-Quellen.

Mit dem Austritt des Vereinigten Königreichs aus EURATOM wurde der JET schrittweise abgewickelt und 2023 endgültig geschlossen und rückgebaut. Großbritannien baut, wie viele andere Länder auch, in Zukunft vor allem auf eine national ausgerichtete Forschungsinfrastruktur. Die durchaus beachtlichen positiven Wissenseffekte für das „System“ Tokamak blieben somit auf grundlegende physikalische Erkenntnisse beschränkt. Wollte man noch ein positives Ergebnis hervorheben, ist JET der erste große Tokamak, welcher gegenwärtig praktische Erfahrungen mit dem später unumgänglichen Rückbau von Kernfusionsreaktoren sammelt ...

#### 4.2.1.2 Commonwealth Fusion System (CFS)<sup>32</sup>

Commonwealth Fusion System (CFS) ist der Idealtyp eines aus einem Großforschungsinstitut heraus gegründeten „New Venture“, welches mit erheblicher privater Kofinanzierung große Pläne zu innovativen Fusionsplänen aufruft, sich aber angesichts fehlender Experimentalinfrastruktur auf die Entwicklung von Hochtemperatur-Supraleiter-Magneten fokussiert. CFS war ursprünglich eine Ausgründung des MIT Institute for Plasmaphysics (2018). CFS baut ebenfalls auf die Entwicklung eines Tokamak-Experimentalreaktors, allerdings setzt sich das Unternehmen bewusst vom „Big is beautiful“ der Großforschungseinrichtungen ab: Das Volumen für den geplanten Reaktor, genannt SPARC, beträgt nur 14 m<sup>3</sup> (zum Vergleich: ITER ist für 840m<sup>3</sup> ausgelegt). Erste D-T-Experimente sind mehrfach verschoben worden und jetzt für die späten 2020er Jahre angekündigt; dies wäre immer noch mehr als eine Dekade vor den D-T-Experimenten, die am ITER geplant sind. Im Anschluss an den Experimentalreaktor SPARC ist dann für Mitte der 2030er Jahre der Beweis eines kommerziellen Kernfusionsreaktors, genannt ARC, mit 400 MWel geplant. Dieser sieht eine D-T Fusion mit zeitgleicher Tritium-Erbrütung und einer Wolfram-Reaktorwand vor. Kooperationspartner ist Dominion Energy am Standort Chesterfield Country, Virginia. Sollte dieser Zeitplan auch nur im Entferntesten eingehalten werden, wären sowohl der ITER (Experimentalreaktor mit Tritium-Erbrütung) als auch der folgende DEMONstrationsreaktor überflüssig geworden.

CFS erhält umfangreiche öffentliche und private Finanzierung. Zur privaten Seite gehören Beteiligungen von Eni, Breakthrough Energy Ventures, Khosla Ventures, etc. Darüber hinaus hat CFS ein Power Purchasing Agreement (PPA) mit Google für die frühen 2030er Jahre abgeschlossen; ob dieses mit Fusionsenergie ausgeführt werden kann, ist allerdings extrem unwahrscheinlich. CFS bleibt auch von öffentlicher Finanzierung abhängig, u.a. im US-DOE INFUSE Programm.

Während die Fusions-Test- und -Reaktorpläne aus heutiger Sicht unrealistisch erscheinen, konzentriert sich CFS auf die niedrighwelliger Einkommensquelle, nämlich die Entwicklung von supraleitenden Hochtemperaturmagneten, aus Seltenen Erden, Barium, Kupferoxid, etc. In

---

<sup>32</sup> June 2025: <https://youtu.be/dTbd0wmOwzY>.

diesem Segment konnte CFS mit 20 Tesla Feldstärke einen Weltrekord aufstellen. Diese Magneten sind in einer Vielzahl von Anwendungen stark nachgefragt, u.a. Magnetresonanztomographie (MRI), Magnetschwebbahnen, bestimmte Arten von Motoren, und Windturbinen, insb. bei Generatoren mit hoher Leistungsdichte.

Im Ergebnis repräsentiert CFS wie kein anderes Unternehmen die Dynamik und Agilität der New Ventures, die die etablierten Großforschungseinrichtungen vor existenzielle Herausforderungen stellen. Auch wenn die für den ARC angestrebten Ziele für einen kommerziellen Fusionsreaktor nicht erreicht werden sollten (was wahrscheinlich ist), lässt CFS den ITER-Nachfolger DEMO, der ab den 2050er Jahren geplant ist, bereits heute sehr alt aussehen. Kommerziell wettbewerbsfähige Energieerzeugung ist aber auch von CFS nicht zu erwarten, das Geschäftsmodell beruht vielmehr auf der Entwicklung von Hochtemperatur-Supraleitenden Magneten.

## **4.2.2 Stellerator**

### **4.2.2.1 Wendelstein-7X**

Wendelstein-7X, der weltweit größte Experimental-Stellerator (30 m<sup>3</sup>) des Instituts für Plasmaphysik (IPP) am Standort Greifswald, ist ein typisches Beispiel für Fortschritte bei der plasmaphysischen Grundlagenforschung, die jedoch keinerlei Anspruch auf kommerzielle Energieproduktion erhebt. In der „alten“ Bundesrepublik in den späten 1950er Jahren als eigenes Forschungsprogramm am IPP entwickelt (Grieger et al., 1985), begann der Bau 2005 am Standort der Universität Greifswald in der Nähe des 1990 geschlossenen Kernkraftwerks Lubmin. Der Arbeitsauftrag lag und liegt auf Grundlagenforschung zu Stabilitäts- und Prozessbedingungen für einen Stellerator mit D-D (Deuterium-Deuterium) Brennstoff. Dadurch werden zwar Komplikationen mit radioaktivem Tritium vermieden, welchen andere Experimentalreaktoren haben. Jedoch bleibt ein zentraler Schritt in Richtung kommerzieller Nutzung aus, wird doch heute davon ausgegangen, dass nur eine D-T-Fusion die notwendigen Energiemengen erreichen kann, die eines Tages zu kommerziellen Reaktoren führen könnte.

Die wissenschaftlichen Erfolge des Wendelstein 7X sind unbestritten, wie z.B. der Tripel-Weltrekord mit sechs Sekunden Einschlusszeit im Jahr 2008, ein Plasmabetrieb für acht Minuten (2023, allerdings nicht D-T) sowie der Weltrekord für einen Langfristplasma mit Fusion im Jahr 2025 (idem: kein D-T). Allerdings ist von außen nicht klar, ob und wie diese wissenschaftlichen Fortschritte nicht auch schon früher hätten erreicht werden können. Fakt ist, dass das ursprüngliche Ziel eines positiven Energieverhältnisses ( $Q > 1$ ) bis heute nicht erzielt ist.

Das IPP ist ein Max-Planck-Institut öffentlichen Rechts und erhält öffentliche Grundfinanzierung. Darüber hinaus beteiligt es sich an deutschen und europäischen Ausschreibungen. Auf den „Spuren“ vom MIT und dem CFS gründete das IPP im Jahr 2024 das Unternehmen Proxima-Fusion mit vier hochqualifizierten Mitarbeitern aus. Seitdem ist Proxima sehr erfolgreich in der

Akquise privater Kofinanzierung. Das Ziel von Proxima ist (wie bei CFS) auch nicht ein kommerzieller Reaktor, sondern die Entwicklung eines Stellerator Model Coil (SMC).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der Wendelstein-7X die Dynamik und Instabilität der Kernfusions-Saga gut abbildet: Vormalig angesichts des scheinbaren Siegeszugs des Tokamaks (ITER) als Außenseiter weitgehend abgestempelt, hat die Technologielinie eine „Renaissance“ erlebt und stellt wieder eine Option in der Spitzengruppe dar. Als größter Forschungsreaktor weltweit mit guten technischen Werten steht der Wendelstein-7X heute in der Spitzengruppe international dar. Dennoch spiegelt auch der „erfolgreiche“ Wendelstein-7X das Dilemma der Großforschungseinrichtungen wieder: Aufgrund der Limitierung auf D-D-Fusion sowie grundlegenden verbliebenen Fragen der Plasmaphysik sind auch langfristig keine Rückschlüsse auf kommerzielle Energieerzeugung zu erwarten.

#### **4.2.2.2 Type One Energy Group (TOE)**

Type One Energy (TOE) ist das Pendant zu CFS für den Stellerator Magneteinschluss: Ein agiles, gut privat kofinanziertes Unternehmen, welches sich im Fusions-Hype auf die Entwicklung und Anwendung von Magnettechnologie fokussiert, gleichzeitig aber auch die kommerzielle Nutzung von Stellerator Fusionsenergie vorantreibt. TOE entstand durch eine Ausgründung aus der University of Wisconsin und hat sich seit 2019 zu einem Netzwerk unterschiedlicher Aktivitäten an unterschiedlichen Standorten weiterentwickelt. Langfristziel ist der Bau eines Stellerator-Demonstrationsreaktors mit großem Volumen (386 m<sup>3</sup>) und Leistung (800 MW thermisch, für 350 MW<sub>el</sub> Strom), genannt Infinity Two am Standort Clinton (Tennessee) der Tennessee Valley Authority (TVA). Auf dem Weg dahin erfolgen Arbeiten mit dem Reaktor-Infinity One am National High Magnetic Field Laboratory (MagLab) sowie in Kooperation mit dem Oak Ridge National Laboratory (ORNLG), dem MIT Plasma Science and Fusion Center (PSFC) sowie dem CFS zur Magnetentwicklung. Wie bei anderen New Ventures auch ermöglicht diese Fokussierung evtl. ein Überleben des Unternehmens, auch wenn das Ziel der Produktion von Kernfusionsenergie nicht erreicht wird.

TOE war ähnlich erfolgreich wie CFS bei der Einwerbung öffentlicher und private Finanzierung. Nach der öffentlichen Start-Finanzierung durch das DOE-ARPA-BETHE Programm (2019) kam der Durchbruch durch eine Finanzierung des Breakthrough Energy Ventures (2022), an die sich weitere Finanzierungsrunden anschlossen, insgesamt in Höhe von etwa USD 170 Mio.

Wiederum analog zu CFS steht die Type One Energy Group somit in gewisser Weise in Konkurrenz von Big Science in der Stellerator-Forschung. Selbst wenn das Unternehmen nur einen Bruchteil seiner Umsetzungsagenda auf dem Weg zu einem Demonstrations-Stellerator Wirklichkeit werden lässt, würde die auskömmliche Grundlagenfinanzierung, z.B. des IPP mit dem Wendelstein-7X, anfangen zu wackeln. Vor diesem Hintergrund sind laufende Verzögerungen des Demonstrators Infinity two als "normaler" Teil der Entwicklungsstrategie zu interpretieren.

„Echte“ kommerzielle Kernfusion zur Energiegewinnung ist aber aufgrund der Vielzahl ungelöster technischer Fragen selbst von TOE nicht zu erwarten. Mittelfristig liegt der Hauptbeitrag von TOE zur technischen Entwicklung, und zur Finanzierung, auf der Entwicklung von Magneten und der Systemintegration.

### **4.2.3 Trägheitseinschluss**

#### **4.2.3.1 National Ignition Facility (NIF)**

Die National Ignition Facility (NIF), 1997 innerhalb des Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) eingerichtet, hat inzwischen über drei Jahrzehnte grundlegende Forschung zu fusionsbasierten Waffensystemen geleistet. In diesem Zusammenhang wurden technologische Fortschritte erzielt, mit denen heutzutage auch Ideen für eine kommerzielle Energiegewinnung, insb. durch New Ventures, populär geworden sind. Jedoch ist von der Forschungsstrategie der NIF, welche u.a. die Entwicklung von Hochleistungslasern beinhaltet und seit 2022 auch erfolgreiche Fusions-Experimente durchführt, kein Weg zu kommerzieller Energienutzung zu erwarten.

Die Existenzberechtigung für die NIF bildet die Aufrechterhaltung des Kernfusions-Waffenarsenals für die USA im Rahmen des „Stockpile Stewardship Program“. Dies ist das US-Programm zur Zuverlässigkeitsprüfung, Funktionsfähigkeit, Zertifizierung und Instandhaltung von Atomwaffen, die aufgrund des Test Ban Treaties seit 1992 ohne Atomtests stattfinden müssen. Da die USA seit 1992 keine neuen Atomwaffen mehr entwickelt haben, sind selbst ihre jüngsten Waffen über 35 Jahre alt. In diesem Kontext entwickelt die NIF Hochleistungs-Lasersysteme und leistet Grundlagenforschung für Weltraum- und Militär-Anwendungen. Die Erzeugung von Kernfusionsenergie gehört explizit nicht zu den Aufgaben des NIF.

Die NIF hat erhebliche Fortschritte bei der Entwicklung von Laserfusion erzielt: Nach einem 4-Beam Test (10 kJ, 2008) wurde die Leistung schrittweise gesteigert und lag 2022 bei 192 Laserbeams mit einer Strahlungsarbeit von 1,8 MJ. Hiermit können Schüsse in Leistungsbereichen bis zu 500 MW erzielt werden können. Parallel wurde eine Kammer mit einem inneren Radius von fünf Metern entwickelt, innerhalb der durch indirekte Trägheitsfusion von Deuterium und Tritium in einem Gold-beschichteten Hohlraum induziert werden kann. Im Dezember 2022 erfolgte in dieser Kammer die weltweit erste Entzündung eines D-T Gemischs mit einem positiven Q-Faktor (im engeren Sinne): Mit einem Laser-Energieinput von 2,05 MJ wurde ein Fusions-Energieoutput von 3,15 MJ erzielt, d.h.  $Q = 1,54$ .<sup>33</sup> Seitdem wird der Output bei wiederholten Experimenten regelmäßig gesteigert, zuletzt auf 8,6 MJ (2025).

---

<sup>33</sup> Unter Berücksichtigung des für die Erzeugung der Laserenergie notwendigen 300 MJ relativiert sich das Ergebnis, folgt doch ein Gesamt-Energiefaktor Q von lediglich 0,01 (1%).

Die NIF trägt durch das Innovation and Partnership Office (IP) des LLNL zur Diffusion ihrer Forschungsergebnisse in die Industrie bei. Jedoch ist in dem bis zum Jahr 2040 angelegten Forschungsprogramm (Grundlagenforschung für Astronomie, Militär, Lasersysteme, Effizienz, etc.) keinerlei Fokus auf kommerzielle Nutzungen vorgesehen. Mit maximal 700 Schüssen pro Jahr, d.h. etwa zwei pro Tag, verbleibt die NIF auf der Ebene angewandter Forschung: Kernfusionssysteme sind und bleiben kein Teil ihres Forschungsprogramms. NIF entwickelt weiterhin für die US-Regierung Wissen zu atomaren Waffensystemen mit Lasertechnologie.

#### **4.2.3.2 Focused Energy (FE)**

Focused Energy (FE) ist eine Ausgründung aus dem wissenschaftlichen Umfeld, welche mit erheblichem öffentlichem und privatem Geld eine Außenseiter-Technologie (Trägheitsfusion) wieder auf die Tagesordnung gesetzt hat. Obwohl konkrete Pläne für eine kommerzielle Energieerzeugung unklar und in den angekündigten Zeiträumen (Fusionskraftwerke am Standort Biblis bis 2034) aus heutiger Sichter über-optimistisch erscheinen, erhöht der Erfolg von FE den Rechtfertigungsdruck auf die konventionelle Forschungslandschaft.

FE ging aus dem Münchener New Venture Marvel Fusion hervor. Es wurde 2021 aus der Technischen Universität Darmstadt und der University of Texas at Austin durch Prof Markus Roth und Dr. Thomas Forner gegründet und war 2026 neben Darmstadt auch in San Francisco ansässig. Das Unternehmen hat somit Zugang zu beiden Forschungsnetzwerken und -finanzierung. Nach einer Anschubfinanzierung durch das DOE-Milestone-Based Fusion Development Program (2022) hat FE in mehreren Finanzierungsrunden größere Volumina attrahieren können, u.a. eine Series A des Prime Mover Lab (USD 11 Mio.) sowie der Deutschen Agentur für Sprunginnovationen (SPRIND, € 50 Mio.).

FE verfolgt den direkten Trägheitseinschluss durch Beschuss von D-T-Kapseln mit Hochleistungslasern. Es nutzt dabei Wissen aus dem LLNL/NIF Forschungsprogramm, von dem es auch Mitarbeiter gewinnen konnte. Dieses Forschungsprogramm begann 2022 mit einem Laser-Verstärkungslabor am Standort Darmstadt und wurde danach durch ein Labor in Austin ergänzt. Bis 2028 soll eine Experimentalanalyse T-STAR zum Protonenbeschuss mit multi-Beam, Short-Pulse Lasern erfolgen. Im Anschluss soll in den frühen 2030er Jahren ein Pilot-Reaktor „Super Nova“ entstehen. Der große Sprung wäre dann der Bau eines Demonstrationsreaktors, Ende der 2030er Jahre am Standort Biblis. Dieser soll kommerzielle Energieerzeugung durch Schussfrequenzen von 10 Hz (10 Schüsse pro Sekunde) erzielen, die benötigten ca. 1 Mio. Kapseln pro Tag selber erzeugen sowie eine Vorrichtung zur Erbrütung von Tritium als Brennstoff beinhalten. Allerdings liegen weder für SuperNova noch das kommerzielle Fusionskraftwerk derzeit konkrete Konzepte vor. In der Zwischenzeit baut FE auf Koprodukte und Erlöse in den Bereichen Lasertechnik, zerstörungsfreie Materialforschung sowie Gesundheitstechnik.

#### **4.2.4 Field-Reversed Configuration (FRC)**

##### **4.2.4.1 Inductive Particle Accelerator (IRA)**

Das Inductive Particle Accelerator (IRA) Projekt ist ein Beispiel für ein seit den 1960er Jahren im öffentlichen Sektor betriebenes „Spezialprojekt“, welches im Lauf der Jahrzehnte besser geworden ist, jedoch noch keinerlei kommerzielle Erfolge erzielen konnte. Gleichzeitig bekommt das öffentliche Forschungsprojekt durch die dynamische Entwicklung seiner Ausgründung, Helion Energy (HE), ex-post eine besondere Bedeutung.

IPA wurde 2006 an der University of Washington aufgesetzt und lief dann bis 2012. Es baute auf den LSX-Reaktor auf, der wiederum eine Reihe weiterer Vorgänger seit den 1960er Jahren hatte, sowohl im State Washington als auch an anderen Standorten. Das IPA-Projekt erhielt öffentliche Finanzierung u.a. durch das DOE. Eine weitere Kooperation bestand mit den Los Alamos National Laboratory (LANL) sowie dem Air Force Research Laboratory (AFRL). Zu der Zeit bestand kein Zugang zu privater Finanzierung.

FRC ist in der Welt der Fusionstechnologien ein Exot, weil die Energiegewinnung induktiv erfolgt, d.h. ohne den Umweg über Dampf und eine rotierende Turbine. Die Übertragung von Induktionsstrom ist zwar effizienter, aber industriell noch nicht ausgereift. Auch wurde für diese Fusion eine besonders komplizierte Brennstoffkombination gewählt: Deuterium-Helium, welche sich durch eine besonders geringe Reaktivität auszeichnet, die auf etwa 5.000 mal geringer als die D-T Fusion geschätzt wird. Daher liegen die Q-Werte und das Lawson-Kriterium systemisch niedrig, obwohl seit den 1960er Jahren an dieser Form der Fusion geforscht wird.

##### **4.2.4.2 Helion Energy (HE)**

Helion Energy (HE) ist eine schillernde Erscheinung am Kernfusionshimmel, weil sie die Technologie der 1960er Jahre in einem neuen, potenziell kommerzialisierbaren Gewande trägt und weil sich aus der KI- und Start-Up Szene u.a. Sam Altman, der Gründer von Open AI, als Vorsitzender des Aufsichtsrats (2025), öffentlichkeitswirksam an Helion beteiligen. HE wurde 2013 aus der University of Washington und dem IPA-Projekt ausgegründet und beschäftigte 2025 ca. 450 Mitarbeiter. Die drei Gründer waren vorher Mitarbeitende am IPA, insb. John Slough arbeitet dort seit den 1980er Jahren an der FRC-Plasmaanlage. Helion konnte neben öffentlicher Förderung durch die DOE-ARPA sowie INFUSE Programme über 1 Mrd. USD an privater Finanzierung einnehmen, u.a. 500 Mio. USD in 2021 und nochmals 425 Mio. USD in einer Serie-F Versteigerung.

Bereits heute plant das Unternehmen die Stromproduktion für das Jahr 2028 und hat im Jahr 2025 mit Microsoft ein Power Purchase Agreement (PPA) über 50 MW abgeschlossen. Darüber hinaus besteht eine Partnerschaft mit dem Elektrostahlunternehmen NUCOR, für ein Stahlwerk eine 500 MW Fusionskraftwerk gebaut werden soll. Es käme allerdings einem Wunder gleich, wenn bis dahin tatsächlich Strom aus der geplanten Fusionsanlage käme. Öffentlich kündigte

Helion einen Strompreis von 1 UScents/kWh an, dies liegt erheblich unter dem Großhandelspreis von 4-5 US-Cents an den US-amerikanischen Strommärkten. Die betriebswirtschaftliche Grundlage dieses Preises ist, wie alle anderen kommerziellen Ankündigungen des Unternehmens, nicht durch Quellen oder entsprechende Informationen unterlegt.

Das Forschungs- und Produktionsprogramm von HE beinhaltet den vierten Prototyp der FRC, genannt „Grande“ (2014), mit 4 Tesla Feldstärke. Der sechste Prototyp, „Trupty“, wurde 2020 in Betrieb genommen und kam auf eine Feldstärke von 8 Tesla und 100 Mio. Grad Celsius. Trotz langer Betriebszeiten (16 Monate) ist nichts über die erzielten Q- bzw. Lawson-Werte bekannt. Die neue Generation, der für Mitte der 2020er angekündigte „Polaris“ Reaktor, soll sowohl D-<sup>3</sup>H- als auch D-D-Fusionen ermöglichen und einen Q-Faktor von über 1 aufweisen. Die jüngeren Entwicklungen von Helion Energy lassen auf eine besondere Dynamik schließen, insb. verbessern sich die technischen Parameter dieses seit den 1960er Jahren zögerlich entwickelten Reaktorkonzepts rapide. Andererseits ist nicht abzusehen, wie und wann mit diesem besonders komplexen Reaktorkonzept wettbewerbliche Energie erzeugt werden soll.

#### **4.2.5 Einordnung der Fallstudien**

Die Fallstudien vertiefen das Verständnis des Sektors, indem sie idealtypische Charakteristika von Kernfusionsprojekten aufzeigen.

„Governance matters!“ Die öffentlich geförderte Grundlagenforschung hat schrittweise Fortschritte bzgl. „ihrer“ Reaktortechnologien und zugrundeliegenden Mechanismen vorangebracht hat, wie z.B. die Entwicklung von Stelleratoren (Wendelstein-7X) bzw. Trägheitsfusion (NIF) aufzeigen. Ob diese Tätigkeit durch die vielen Jahrzehnte effizient gewesen ist, lässt sich anhand der vorliegenden Evidenz nicht beurteilen. Jedoch ist eine gewisse Skepsis angebracht, wenn man sich die großen Mengen an Geld und Köpfen und die vielen Jahrzehnte vor Augen führt, die diese Forschung nun schon hinter sich hat.

Privat kofinanzierte New Ventures arbeiten unter anderen technischen und finanziellen Rahmenbedingungen: Sie müssen „Marktanteile“ vorweisen, entweder reale, wie z.B. bei der Erstellung von Nebenprodukten wie Magnet- oder Laserentwicklung, oder „fiktive“ durch die öffentlichkeitswirksame Ankündigung (offensichtlich unrealistischer) Realisierungspläne für kommerzielle Reaktorprojekte. Immerhin bringen diese (übertriebenen) Ankündigungen Musik in die Szene und setzen die Großforschungseinrichtungen unter Druck.

Es passiert viel! Die Kernfusions-Community ist nach einigen eher ruhigen Jahrzehnten zu Beginn des 21. Jahrhunderts aufgewacht. Die Fallstudien belegen die Beschleunigung von Bemühungen in allen Technologielinien, vom Tokamak über den Stellerator zur Trägheitsfusion. Selbst in so ausgefallenen Bereichen wie der Field Reversed Configuration (FRC) ist durch das „enfant terrible“ der Szene, Helion Energy, eine unerwartete Dynamik entstanden. Die Finanzierungsvolumina spiegeln die Dynamik wieder und stiegen in den vergangenen Jahren

exponentiell. Die unglücklich verlaufenden internationalen Großprojekte wie der JET und vor allem der ITER führen zu eine Re-Nationalisierung von F&E Bemühungen, was evtl. die private Kofinanzierung erleichtert.

Trotz aller Dynamik belegen die Fallstudien aber auch die im vorigen Kapitel 3 dargestellte er-nüchternde Bilanz bzgl. des öffentlich aufgebauten Hoffnungs panoramas einer unendlichen, günstigen und sauberen Energie aus Kernfusion: Kein einziges Projekt, öffentlich oder privat, ist in der Lage gewesen, die bekannten oder auch noch unbekanntem technische Hürden auf dem Weg zu kommerzieller Energienutzung zu überwinden. Keiner der von den Privaten angekündigten Pfade zu Demonstrationsreaktoren ist objektiv nachvollziehbar, und „Demonstrator“ heißt noch lange nicht „kommerzielle Stromerzeugung“. „Die Fusionskonstante lässt wiederum grüßen“!

		Großfor- schung (GF) oder kommer- ziell (K)	Meilensteine und Nebenprodukte	Q-Faktor, bzw. andere Pa- rameter	Aktueller Stand
Tokamak	Joint European Torus (JET)	GF	~ 1973: Inbetriebnahme ~ 1997: Weltrekord Q-Faktor ~ 2000: Experimente fortgesetzt ~ 2023: Schließung	Q = 0.67 (1997)	~ Seit 2023 im Rückbau ~ Re-Nationalisierung der KF-Forschung in neuem Cluster (Nottinghamshire)
	Commonwealth Fusion Sys- tem (CFS)	K	~ 2018 als Spin-off ausgegründet (vom MIT Plasma Science and Fusion Center)	Q-Faktor unbekannt Magnetfeld-Weltrekord (20 Tesla)	Geplant: ~ 2027 SPARC Teststruktur mit Q > 1 (18 m <sup>3</sup> klein) ~ 2030er: Kommerzieller Kernfusionsreaktor ARC (in Virginia) ~ Privater Kapitalzufluss hält an
Stellarator	Wendelstein-7X	GF	~ Seit 1960er Jahren: Unterschiedliche „Wendelstein“-Designs entwickelt ~ 2005 – 2015: Aufbau W 7-X im IPP (Standort Greifswald)	Weltrekord Plasmahaltung im Stellarator: 8 Minuten (2025)	~ International führendes Stellarator-Konzept ~ Keine Plan für eigene kommerzielle Energienutzung ~ Kooperation mit IPP-Ausgründung Proxima Fusion
	Type One Energy Group (TOE)	K	~ 2018 Gründung durch Forschende, u.a. mit Erfahrung an der Uni Wisconsin-Madison ~ Kooperation mit Magnet-Technologie mit dem MIT / CFS	~ HTS Magnetsystem ~ Erfolgreiche Entwicklung von Hochtemperatur-Supraleitern	Geplant: ~ Fokus auf Magnetentwicklung ~ Späte 2020er: Test-Reaktor mit Tennessee Valley: Infinity One ~ 2030er Jahre: HTS-Magnet Stellarator (386 m <sup>3</sup> , 350 MW <sub>el</sub> ) mit TVA: Infinity Two
Trägheitseinschluss	National Ignition Facility (NIF)	GF	~ 1997 Neue Forschungseinheit (NIF) im LL National Lab ~ 2022: Erste Trägheits-Laserfusion mit Q>1 (im engeren Sinne): Output pro Schuss: 3,5 MJ ~ 2025 Steigerung des Outputs auf 8,5 MJ/Schuss	Q (im engeren Sinne): 1,67 (2022) bzw. 4,1 (2025)	~ Fokus auf Laserentwicklung ~ Laserfrequenz bis 100 MJ/Schuss ~ Keine kommerzielle Energieproduktion in Planung
	Focused Energy (FE)	K	~ 2021: Spin-off von TH Darmstadt und University of Texas (Austin) ~ 2025 Standortentwicklung in Darmstadt und San Francisco (Kalifornien)	~ Entwicklung eigener Laser-Systeme inkl. Diagnostik	~ 2026 “Proof of ICF concept” für Proton-Fast Ignition (PFI) ~ 2028: Testanlage für Proton-basierende fast Ignition („T-Star“) ~ Frühe 2030er Jahre: Experimentalanlagen mit hohen Energiegewinnen (1 Schuss / 3 Minuten) ~ späte 2030er: D-T-Fusion mit Tritium-Erbrütung, hohe Neutronenstrahlung
Field-Reversed Configuration (FRC)	Inductive Particle Accelerator (IRA)	GF	~ 2006-2012: Projektentwicklung an der University of Washington (USA), basierend auf Arbeiten aus den 1960er Jahren	Kompression auf > 1 keV mit D-D-Fusion; Entwicklung eines Updates für magneto-inertial Fusion (2010)	~ Langfristige Grundlagenforschung ~ Strukturierter Übergang in kommerzielle Helion Energy (auch Teil des Personals)
	Helion Energy (HE)	K	2013: Ausgründung des IPA (University of Washington) ~ 2014-2020 : Prototypen 4-6 („Grande“, „Venti“, „Trenta“) ~ 2023: Power Purchase Agreement (PPA) mit Microsoft (2028: 50 MW <sub>el</sub> )		~ 2026 Pilot-KF-Reaktor (“Palais”) ~ 2028: Demonstrationskraftwerke (50 MW <sub>el</sub> )

Tabelle 3: Charakteristika und technische Parameter von je vier öffentlichen und privaten Kernfusions-Unternehmen

Quelle: Eigene Zusammenstellung auf der Basis von (Dering, 2025, 2026) und weiterer Literatur.

## 5 Fazit: Notwendigkeit eines unabhängigen Kernfusions-Monitorings

In diesem Bericht wird der aktuelle Stand der Diskussion zur Kernfusion der Forschungsgruppe AT-OM zusammengefasst, welcher Grundlage für forschungspolitische Schlussfolgerungen ist. Insb. haben wir nach der nicht-technische Einführung versucht, eine Verschiebung der Perspektive zu begründen, welche in der öffentlichen Diskussion fehlt: Bei der Kernfusion auf der Erde geht es nicht darum, in absehbaren Zeiträumen Energie zur Verfügung zu stellen. Vielmehr müssen F&E- und Innovationspolitik darauf geprüft werden, ob sie in ihren jeweiligen Teilgebieten Perspektiven jenseits der energetischen Nutzung eröffnen und ob diese den Aufwand öffentlicher Förderung rechtfertigen.

Angesichts der umfangreichen Forschungsmittel, die für die Kernfusion geplant sind, ist eine objektive Analyse von Chancen und Risiken dieser Finanzierung nützlich, was bisher (mit sehr wenigen Ausnahmen) im Diskurs fehlt. Förderprogramme im Bereich Kernfusion sollten einem unabhängigen, externen Monitoring unterliegen. Dieses sollte technologische Entwicklungen, Einordnung der Trends von öffentlicher Grundlagenforschung und New Ventures sowie internationale Entwicklungen beinhalten. Der von DIW / TU Berlin entwickelte Ansatz erlaubt eine Einschätzung über die unterschiedlichen Dynamiken in beiden Marktsegmenten. Ein jährliches „Fusion Monitoring“ wäre ein sinnvoller erster Schritt in diese Richtung.

## Literatur

- acatech, Wurbs, S., Dehlwes, S., Lübke, A., Stephanos, C., Stöcker, P., Fishedick, M., Henning, H.-M., Löschel, A., Matthies, E., Pittel, K., Renn, J., Sauer, D. U., & Spiecker, I. (2024). *Kernfusion als Baustein einer klimaneutralen Energieversorgung? Chancen, Herausforderungen, Zeithorizonte* (Impuls). acatech. <https://www.acatech.de/publikation/energiegewinnung-mit-kernfusion/>
- Acheson-Lilienthal Report. (1946). *A Report on the International Control of Atomic Energy* (Prepared for the Secretary of State's Committee on Atomic Energy, S. 60). <http://fissilematerials.org/library/ach46.pdf>
- Antweiler, W., & Muesgens, F. (2025). The new merit order: The viability of energy-only electricity markets with only intermittent renewable energy sources and grid-scale storage. *Energy Economics*, 145, 108439. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108439>
- Badziak, J. (2012). Laser nuclear fusion: Current status, challenges and prospect. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 60(4), 729–738. <https://doi.org/10.2478/v10175-012-0084-8>
- Barbarino, M. (2020). A brief history of nuclear fusion. *Nature Physics*, 16(9), 890–893. <https://doi.org/10.1038/s41567-020-0940-7>
- Bärenbold, R., Bah, M. M., Lordan-Perret, R., Steigerwald, B., Von Hirschhausen, C., Wealer, B., Weigt, H., & Wimmers, A. (2024). Decommissioning of commercial nuclear power plants: Insights from a multiple-case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 201, 114621. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114621>
- Bickerton, R. J., Pease, R. S., Hawryluk, R., Allen, J. E., Lackner, K., & Robinson, D. C. (1999). History of the Approach to Ignition [and Discussion]. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 357(1752), 397–413. JSTOR.
- Böhnlein, S., Böse, F., & Wimmers, A. (2026). The System Good Nuclear Fusion—Organizational Approaches and Two Case Studies on Magnetic Confinement Fusion. In A. Wimmers, F. Böse, C. Kemfert, & C. Von Hirschhausen (Hrsg.), *Nuclear Power* (S. 99–133). Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-99894-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-99894-2_4)
- Böse, F. (2026). The First Nuclear Century: A Long-Term Analysis of Nuclear Reactor Development in the US (1939–2024). In A. Wimmers, F. Böse, C. Kemfert, & C. Von Hirschhausen (Hrsg.), *Nuclear Power* (S. 287–319). Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-99894-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-031-99894-2_11)
- Böse, F., Dering, C., Kemfert, C., Sirilertworakul, R., Wimmers, A., & von Hirschhausen, C. (2026). Innovation Dynamics and Long-Term Technological Development of Nuclear Fusion Reactors (– Long-term Analysis from 1942–2025) in a Multi-Level Perspective. *Manuscript*.
- Braams, C. M., & Stott, P. E. (2002). *Nuclear fusion: Half a century of magnetic confinement fusion research*. Inst. of Physics Publ.
- Buschner, A., Rechlitz, J., Menge, P., & von Hirschhausen, C. (2026). Fusion Constant. *Manuscript*.
- Cowan, R. (1990). Nuclear Power Reactors: A Study in Technological Lock-in. *The Journal of Economic History*, 50(3), 541–567. <https://doi.org/10.1017/S0022050700037153>
- Daniels, F. (1944). *Suggestions for a high-temperature pebble pile* (Technical Report N-1668b). University of Chicago. <https://www.osti.gov/servlets/purl/4359817>
- Delene, J. G. (1991). Updated Comparison of Economics of Fusion Reactors With Advanced Fission Reactors. *Fusion Technology*, 19(3P2A), 807–812. <https://doi.org/10.13182/FST91-A29443>
- Dering, C. (2025). *Innovation Dynamics and Technological Maturity in the Fusion Sector: A Techno-Economic Assessment of Fusion Projects*. Technical University Berlin.

- Dering, C. (2026). Innovation Dynamics and Corporate Strategies in Nuclear Fusion: Comparison of Public and Private Actors Using a Techno-Economic Framework. *Environmental Innovation and Societal Transitions*. <https://doi.org/1-23->
- Dering, C., Wimmers, A., Böse, F., Kemfert, C., Krauß, J., Steigerwald, B., & von Hirschhausen, C. (2026). Kernfusionsforschung verschiebt Schwerpunkt: Kommerzielle Nischenprodukte statt Energieversprechen. *DIW Wochenbericht*, 8. [https://doi.org/10.18723/diw\\_wb:2026-8-1](https://doi.org/10.18723/diw_wb:2026-8-1)
- Dering, C., Wimmers, A., & Von Hirschhausen, C. (2026). Innovation dynamics and technological maturity in the fusion sector: An assessment of fusion projects. *Energy Strategy Reviews*, 64, 102130. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2026.102130>
- Englert, M., & Kopp, A. (2024). *Übersichtsstudie Kernfusion für den Klimabeirat Hessen*. Öko - Institut e.V. [https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/uebersichtsstudie\\_kernfusion\\_oeko-institut-darmstadt.pdf](https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/uebersichtsstudie_kernfusion_oeko-institut-darmstadt.pdf)
- Franck, J., Hughes, D. J., Szilard, L., Hogness, T. S., Rabinowitch, E., Seaborg, G. T., & Nickson, C. J. (1945). *A Report to the Secretary of War ("The Franck-Report")*. <https://sgp.fas.org/eprint/franck.html>
- Fressoz, J.-B. (2025). In tech we trust: A history of technophilia in the Intergovernmental Panel on Climate Change's (IPCC) climate mitigation expertise. *Energy Research & Social Science*, 127, 104280. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2025.104280>
- Grieger, G., Renner, H., & Wobig, H. (1985). Wendelstein Stellarators. *Nuclear Fusion*, 25(9), 1231–1242. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/25/9/040>
- Grubler, A. (2010). The costs of the French nuclear scale-up: A case of negative learning by doing. *Energy Policy*, 38(9), 5174–5188. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.003>
- Grunwald, A., Grünwald, R., Oertel, D., & Paschen, H. (2002). *Kernfusion* (TAB-Sachstandsbericht No. 75). Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. <https://www.itas.kit.edu/pub/v/2002/gruao2b.pdf>
- Grünwald, R. (2024). *Auf dem Weg zu einem möglichen Kernfusionskraftwerk—Wissenslücken und Forschungsbedarfe aus Sicht der Technikfolgenabschätzung* (Nr. 1; TA-Kompakt). Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). <https://doi.org/10.5445/IR/1000177720>
- Haefner, C. L., Alexander, N., Betti, R., Hurricane, O., Ma, T., Stieglitz, R., & Zohm, H. (2023). *Memorandum Laser Inertial Fusion Energy* [BMBF-Expertenkommission zur laserbasierten Trägheitsfusion]. German Federal Ministry for Technology and Research. [https://www.bmftr.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/2023/230522-memorandum-laser-inertial-fusion-energy.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=31](https://www.bmftr.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/2023/230522-memorandum-laser-inertial-fusion-energy.pdf?__blob=publicationFile&v=31)
- Han, W. E., & Ward, D. J. (2009). Revised assessments of the economics of fusion power. *Fusion Engineering and Design*, 84(2–6), 895–898. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2008.12.104>
- Hanusch, H. (2011). *Nutzen-Kosten-Analyse* (3., vollst. überarb. Aufl). Vahlen.
- Helmholtz Gemeinschaft, Forschungszentrum Jülich (FZJ), Forschungszentrum Karlsruhe (FZK), & Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP). (2006). *Kernfusion*. Helmholtz-Gemeinschaft.
- Hender, T. C., Knight, P. J., & Cook, I. (1996). Key Issues for the Economic Viability of Magnetic Fusion Power. *Fusion Technology*, 30(3P2B), 1605–1612. <https://doi.org/10.13182/FST96-A11963181>
- Hirschhausen, C. von, & Wimmers, A. (2023). Rückbau von Kernkraftwerken und Entsorgung radioaktiver Abfälle in Deutschland: Ordnungspolitischer Handlungsbedarf. *Perspektiven der Wirtschaftspolitik*, 24(3). <https://doi.org/doi.org/10.1515/pwp-2023-0032>
- IAEA. (2023). *IAEA World Fusion Outlook 2023: Fusion Energy: Present and Future*. [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/FusionOutlook2023\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/FusionOutlook2023_web.pdf)

- Joskow, P. L. (1982). Problems and prospects for nuclear energy in the United States. In P.L. Daneke, G.A. (Ed.). In P.L. Daneke, G.A. (Hrsg.), *Energy Planning, Policy and Economy* (S. 231–245). Heath and Co.
- Kleidon, A., & Lesch, H. (2024). Kann Kernenergie zur Energiewende beitragen?: Zukünftige Energieversorgung in Deutschland. *Physik in unserer Zeit*, piuz.202401718. <https://doi.org/10.1002/piuz.202401718>
- Kramer, D. (2023). NIF success gives laser fusion energy a shot in the arm. *Physics Today*, 76(3), 25–27. <https://doi.org/10.1063/PT.3.5195>
- Lawson, J. D. (1957). Some Criteria for a Power Producing Thermonuclear Reactor. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 70(1), 6–10. <https://doi.org/10.1088/0370-1301/70/1/303>
- Lazard Ltd (with Roland Berger). (2024). *LAZARD Levelized cost of Energy +* (Version 17.0; S. 48). <https://www.lazard.com/media/xemfeyok/lazards-lcoeplus-june-2024-vf.pdf>
- Marchetti, C. (1974). The Use of Hydrogen as an Energy Carrier. In S. Foner & B. B. Schwartz (Hrsg.), *Superconducting Machines and Devices* (S. 549–562). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2784-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2784-4_8)
- Marchetti, C. (1976). On hydrogen and energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1(1), 3–10. [https://doi.org/10.1016/0360-3199\(76\)90004-5](https://doi.org/10.1016/0360-3199(76)90004-5)
- Marchetti, C., & Nakicenovic, N. (1979). *The Dynamics of Energy Systems and the Logistic Substitution Model* (IIASA Research Report RR-79-013). International Institute for Applied Systems Analysis. <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/1024/>
- Mazzucato, E. (2023). A D-3 He fusion reactor for the mitigation of global warming. *Fundamental Plasma Physics*, 6, 100022. <https://doi.org/10.1016/j.fpp.2023.100022>
- Meier, W. R., Dunne, A. M., Kramer, K. J., Reyes, S., & Anklam, T. M. (2014). Fusion technology aspects of laser inertial fusion energy (LIFE). *Fusion Engineering and Design*, 89(9–10), 2489–2492. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.12.021>
- Meschini, S., Laviano, F., Ledda, F., Pettinari, D., Testoni, R., Torsello, D., & Panella, B. (2023). Review of commercial nuclear fusion projects. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1157394. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1157394>
- Miller, R. L., Spears, W. R., Hancox, R., & Krakowski, R. A. (1991). Comparison of Euratom and U.S. Estimates of Fusion Reactor Costs. *Fusion Technology*, 19(3P2A), 813–819. <https://doi.org/10.13182/FST91-A29444>
- MIT. (2024). *The Role of Fusion Energy in a Decarbonized Electricity System*. Massachusetts Institute of Technology. [https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2024/09/MITEI-FusionReport\\_091124\\_final\\_COMPLETE-REPORT\\_fordistribution.pdf](https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2024/09/MITEI-FusionReport_091124_final_COMPLETE-REPORT_fordistribution.pdf)
- Mödinger, L., Wrede, P., Gerlach, J., Pehlivan, S. T., Johanna Krauß, Böse, F., & Wimmers, A. (2026). Technology Hype and Narratives for Nuclear Fusion. *Manuscript*.
- Münzinger, F. (1960). *Atomkraft: Der Bau ortsfester und beweglicher Atomantriebe und seine technischen und wirtschaftlichen Probleme. Eine kritische Einführung für Ingenieure, Volkswirte und Politiker*. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-85689-1>
- Neles, J. M., Pistner, C., Küppers, C., Kurth, S., Schmidt, G., & Englert, M. (2012). *Kernenergie: Eine Technik für die Zukunft?* (J. M. Neles & C. Pistner, Hrsg.). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-24329-5>
- Nuttall, W. J. (2005). *Nuclear renaissance: Technologies and policies for the future of nuclear power*. IOP.
- Nuttall, W. J. (2022). *Nuclear renaissance: Technologies and policies for the future of nuclear power*. CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/books/9781003038733>
- Nuttall, W., Satoshi, K., Takeda, S., & Webbe-Wood, D. (2025). *Commercializing Fusion Energy—How Small Businesses are Transforming Big Science*. Whittles Publishing.

- Peluso, E., Pakhomova, E., & Gelfusa, M. (2023). New Challenges in Nuclear Fusion Reactors: From Data Analysis to Materials and Manufacturing. *Applied Sciences*, 13(10), 6240. <https://doi.org/10.3390/app13106240>
- Post, R. F. (1956). Controlled Fusion Research—An Application of the Physics of High Temperature Plasmas. *Reviews of Modern Physics*, 28(3), 338–362. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.28.338>
- Putnam, P. C. (1953). *Energy in the Future*. Van Nostrand.
- Radkau, J. (1983). *Aufstieg und Krise der deutschen Atomwirtschaft 1945-1975: Verdrängte Alternativen in der Kerntechnik und der Ursprung der nuklearen Kontroverse*. Rowohlt.
- Radkau, J. (2008). *Technik in Deutschland: Vom 18. Jahrhundert bis heute* (Umfassend überarb. und aktualisierte Neuausg.). Campus.
- Radkau, J. (2017). *Geschichte der Zukunft: Prognosen, Visionen, Irrungen in Deutschland von 1945 bis heute*. Carl Hanser Verlag.
- Reinders, L. J. (2021). *The Fairy Tale of Nuclear Fusion*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-64344-7>
- Schmidt, F. (2025). *On long-duration storage, weather uncertainty and limited foresight* (arXiv:2505.12538). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.12538>
- Schneider, M., Hazemann, J., Godoy, E., Dvorak, P., Gorchakov, D., Gürbüz, Ö., Hrady, B., Jobin, P., Judson, T., Müllner, N., Kobayashi, Y., Ramana, M. V., Stier, S., Schleicher-Tappeser, R., Ting, Y.-C., Suzuki, T., Wimmers, A., Winkler, H., Ahmed, M., ... Meinass, F. (2025). *The World Nuclear Industry Status Report 2025*. Mycle Schneider Consulting. <https://www.worldnuclearreport.org/IMG/pdf/wnisr2025-v1.pdf>
- Smil, V. (2023). *Invention and innovation: A brief history of hype and failure*. The MIT Press.
- Spitzer, S., Pelzer, K., Bauer, A., & Blaschke, M. (2025). *Is Fusion Too Late? How Investors Value its Role in a Decarbonized Europe* (Research Brief WP-2025-20). Center for Energy and Environmental Policy Research at MIT. <https://ceepr.mit.edu/wp-content/uploads/2025/10/MIT-CEEPR-WP-2025-20-Brief.pdf>
- Steigerwald, B., Krauß, J., & Weibezahn, J. (2026). New Ventures in Fusion Energy: Analyzing a Dynamically Emerging Market. In A. Wimmers, F. Böse, C. Kemfert, & C. Von Hirschhausen (Hrsg.), *Nuclear Power* (S. 395–408). Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-99894-2\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-99894-2_14)
- Steigerwald, B., Weibezahn, J., Slowik, M., & Von Hirschhausen, C. (2023). Uncertainties in estimating production costs of future nuclear technologies: A model-based analysis of small modular reactors. *Energy*, 281, 128204. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128204>
- Takeda, S., Keeley, A. R., & Managi, S. (2023). How Many Years Away is Fusion Energy? A Review. *Journal of Fusion Energy*, 42(1), 16, s10894-023-00361-z. <https://doi.org/10.1007/s10894-023-00361-z>
- Tokimatsu, K., Asaoka, Y., Konishi, S., Fujino, J., Ogawa, Y., Okano, K., Nishio, S., Yoshida, T., Hiwatari, R., & Yamaji, K. (2002). Studies of breakeven prices and electricity supply potentials of nuclear fusion by a long-term world energy and environment model. *Nuclear Fusion*, 42(11), 1289–1298. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/42/11/301>
- Tokimatsu, K., Fujino, J., Konishi, S., Ogawa, Y., & Yamaji, K. (2003). Role of nuclear fusion in future energy systems and the environment under future uncertainties. *Energy Policy*, 31(8), 775–797. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00127-1](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00127-1)
- von Hirschhausen, C. (2023). *Atomenergie: Geschichte und Zukunft einer riskanten Technologie* (1. Auflage). C.H.Beck.
- Weidlich, A., Stöcker, P., Pittel, K., Luderer, C., Drake, F.-D., Erlach, B., Fishedick, M., Hanson, J., Henning, H.-M., Kiewitt, W., Kreusel, J., Moser, A., Münch, W., Reuter, A., Sauer, D. U., Schill, W.-P., Sensfuß, F., Spliethoff, H., Stephanos, C., ... Wurbs, S. (2026). Baseload

- power plants are not essential for future power systems. *Cell Reports Physical Science*, 7(1), 103050. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2025.103050>
- Wimmers, A., Böse, F., Buschner, A., Kemfert, C., Krauss, J., Rechlitz, J., Steigerwald, B., & Hirschhausen, C. V. (2025). Kommerzielle Energieerzeugung mit Kernfusion nicht absehbar – Anwendungsforschung entwickelt sich dynamisch. *DIW Wochenbericht*, 92, S. 195201. [https://doi.org/10.18723/DIW\\_WB:2025-13-1](https://doi.org/10.18723/DIW_WB:2025-13-1)
- Wimmers, A., Böse, F., & Göke, L. (2024). *Assessing the viability of non-light water reactor concepts for electricity and heat generation in decarbonized energy systems* (Version 1). arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2412.15083>
- Wimmers, A., Böse, F., Kemfert, C., Steigerwald, B., von Hirschhausen, C., & Weibezahn, J. (2023). Ausbau von Kernkraftwerken entbehrt technischer und ökonomischer Grundlagen. *DIW Berlin Wochenbericht*, 77(10), 111–121.
- Wimmers, A., Böse, F., Kemfert, C., & Von Hirschhausen, C. (Hrsg.). (2026). *Nuclear Power: Technology, Geopolitics, and Economics*. Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-99894-2>
- Wimmers, A., Böse, F., & Von Hirschhausen, C. (2026). Nuclear Physics and Reactor Technologies (Fission and Fusion). In A. Wimmers, F. Böse, C. Kemfert, & C. Von Hirschhausen (Hrsg.), *Nuclear Power* (S. 11–54). Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-99894-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-99894-2_2)
- Wurden, G. A., Hsu, S. C., Intrator, T. P., Grabowski, T. C., Degnan, J. H., Domonkos, M., Turchi, P. J., Campbell, E. M., Sinars, D. B., Herrmann, M. C., Betti, R., Bauer, B. S., Lindemuth, I. R., Siemon, R. E., Miller, R. L., Laberge, M., & Delage, M. (2016). Magneto-Inertial Fusion. *Journal of Fusion Energy*, 35(1), 69–77. <https://doi.org/10.1007/s10894-015-0038-x>
- Wurzel, S. E., & Hsu, S. C. (2022). Progress toward fusion energy breakeven and gain as measured against the Lawson criterion. *Physics of Plasmas*, 29(6), 062103. <https://doi.org/10.1063/5.0083990>