

Bericht

des Ausschusses für Bildung, Forschung und
Technikfolgenabschätzung (18. Ausschuss)
gemäß § 56a der Geschäftsordnung

Technikfolgenabschätzung (TA)

**Auf dem Weg zu einem möglichen Kernfusionskraftwerk –
Wissenslücken und Forschungsbedarfe
aus Sicht der Technikfolgenabschätzung**

Inhaltsverzeichnis

| | Seite |
|--|-------|
| Vorwort des Ausschusses | 3 |
| Wissenslücken und Forschungsbedarfe auf dem Weg zu einem möglichen Kernfusionskraftwerk | 7 |
| 1 Einleitung | 10 |
| 2 Stand der Entwicklung | 12 |
| 2.1 Fusion mit magnetischem Einschluss..... | 14 |
| 2.2 Laser-/Trägheitsfusion..... | 16 |
| 3 Technik von Fusionskraftwerken: offene Fragen | 19 |
| 3.1 Entwicklung kraftwerkstauglicher Materialien | 19 |
| 3.1.1 Erste Wand und Divertor..... | 19 |
| 3.1.2 Strukturmaterialien | 21 |
| 3.1.3 Hochtemperatursupraleiter | 22 |
| 3.2 Tritiummanagement..... | 23 |
| 3.2.1 Tritiumstartinventar | 23 |
| 3.2.2 Tritiumselbstversorgung durch Brüten | 25 |
| 3.3 Balance-of-Plant-Systeme/Integration in ein Gesamtsystem..... | 27 |
| 3.4 Überblick zu Entwicklungsbedarfen und Fazit..... | 28 |

| | Seite |
|--|-------|
| 4 Start-ups | 30 |
| 5 Wie wirtschaftlich kann Strom aus Kernfusion werden? | 32 |
| 5.1 Integration in ein von erneuerbaren Energien geprägtes Stromsystem | 35 |
| 5.2 Fusionskraftwerke in Entwicklungsländern..... | 36 |
| 5.3 Alternative Märkte..... | 36 |
| 5.4 Aufbau einer Fusionsindustrie..... | 37 |
| 5.5 Kleine Reaktoren vs. große Reaktoren | 38 |
| 6 Beitrag zum Klimaschutz | 40 |
| 7 Rohstoffe/Ressourcen | 41 |
| 7.1 Beispiel Helium | 41 |
| 7.2 Beispiel Beryllium..... | 41 |
| 7.3 Beispiel Lithium | 41 |
| 8 Nukleare Sicherheit/Management von radioaktivem Inventar und Abfällen | 43 |
| 8.1 Radioaktives Inventar und Abfälle | 43 |
| 8.1.1 Aktivierungsprodukte | 43 |
| 8.1.2 Tritium..... | 44 |
| 8.1.3 Strategien für die Vermeidung und Entsorgung radioaktiver Abfälle..... | 45 |
| 8.2 Störfälle | 45 |
| 9 Dual Use und Proliferationsrisiken | 47 |
| 9.1 Tritium..... | 47 |
| 9.2 Produktion von Spaltmaterial | 48 |
| 9.3 Fortgeschrittene Kernwaffenexperimente..... | 49 |
| 10 Regulierung | 51 |
| 11 Ausblick und TA-Bedarf | 52 |
| 12 Literatur | 53 |
| 13 Anhang | 60 |
| 13.1 Interviewpartner..... | 60 |
| 13.2 Abbildungen | 60 |
| 13.3 Tabelle | 61 |
| 13.4 Kästen..... | 61 |

Vorwort des Ausschusses

Bei der Kernfusion, der kontrollierten Verschmelzung von Atomkernen, wird eine enorme Menge an Energie frei. Diese Energie nutzbar zu machen, ist seit jeher das Bestreben der Fusionsforschung. Jüngste Fortschritte begründen die Hoffnung, dass die technische Machbarkeit eines energieliefernden Fusionsplasmas in Kürze bevorstehen könnte.

Der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung befasste sich in einer Anhörung am 27. September 2023 intensiv mit den Chancen der Fusionsforschung und Fragen der Forschungsförderung. Am 3. Juli 2024 fand eine weitere Anhörung zum Rechtsrahmen für Fusionskraftwerke in Deutschland und Europa statt.

Der vorliegende Bericht behandelt ergänzend dazu Wissenslücken und Forschungsbedarfe, die bis zum Bau und Betrieb von kommerziellen Kernfusionskraftwerken noch bestehen. Das TAB wurde vom Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung damit beauftragt, offene Fragen zu untersuchen insbesondere im Hinblick auf die technische Machbarkeit, die Versorgung mit dem Fusionsbrennstoff, die Wirtschaftlichkeit, die möglichen Umweltauswirkungen sowie Dual-Use-Potenziale und Regulierungserfordernisse.

Der vorliegende Bericht ist die erste Studie im neuen TA-Kompakt-Format des TAB, das den Informationsbedarf des Deutschen Bundestages bei aktuellen Themen in knapper Form bedient. Der Deutsche Bundestag erhält mit diesem TA-Kompakt eine fundierte Informationsbasis für die parlamentarische Befassung mit diesem wichtigen Zukunftsthema.

Berlin, den 6. Dezember 2024

Kai Gehring
Vorsitzender

Dr. Holger Becker
Berichtersteller

Lars Rohwer
Berichtersteller

Laura Kraft
Berichterstellerin

Prof. Dr. Stephan Seiter
Berichtersteller

**Prof. Dr.-Ing. habil.
Michael Kaufmann**
Berichtersteller

Reinhard Grünwald

**Auf dem Weg zu einem möglichen
Kernfusionskraftwerk –
Wissenslücken und Forschungsbedarfe
aus Sicht der Technikfolgenabschätzung**

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) berät das Parlament und seine Ausschüsse in Fragen des wissenschaftlich-technischen Wandels. Das TAB wird seit 1990 vom Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) betrieben. Hierbei kooperiert es seit September 2013 mit dem IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH sowie der iit der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.

Wissenslücken und Forschungsbedarfe auf dem Weg zu einem möglichen Kernfusionskraftwerk

Zwölf Fragen – zwölf Antworten

Vor dem Hintergrund der seit 2023 erneut intensivierten Debatte über mögliche kommerzielle Fusionskraftwerke wird in dieser TA-Kompakt-Studie die Frage erörtert, welche Herausforderungen für den Bau und den Betrieb solcher zukünftigen Kraftwerke noch zu meistern sind und welche Eigenschaften Fusionskraftwerke voraussichtlich aufweisen werden.

Anhand von zwölf Teilfragen werden hier ausgewählte Ergebnisse der Untersuchung in Kurzform dargestellt, die in den zugehörigen Kapiteln der Studie ausführlicher hergeleitet werden.

1. Welche Materialien eignen sich zum Bau von Fusionskraftwerken?
 - Diejenigen Komponenten eines Fusionskraftwerks, die dem Plasma zugewandt sind, müssen extremen Bedingungen widerstehen, vergleichbar denen auf der Sonnenoberfläche.
 - Der intensive Beschuss mit Fusionsneutronen kann Materialien schädigen und radioaktiv werden lassen.
 - In der Kombination stellen die zu erfüllenden Kriterien eine enorme Herausforderung für die Materialentwicklung dar.
 - Um widerstandsfähige Materialien zu entwickeln und zu testen, sind Bestrahlungstests unabdingbar. Die hierfür geplante Versuchsanlage (IFMIF-DONES) ist dringend erforderlich.
2. Wie werden Fusionskraftwerke mit dem Brennstoff Tritium versorgt?
 - Weltweit steht nur eine sehr begrenzte Menge an Tritium für zivile Zwecke zur Verfügung. Für den Betrieb von ITER reicht sie aus. Aber bereits für DEMO ist dies mit Stand von heute nicht gewiss.
 - Für zusätzliche Anlagen, die Tritium verbrauchen, steht sehr wahrscheinlich kein Tritium zur Verfügung.
 - Zusätzliche Tritiumquellen zu erschließen, ist schwierig und benötigt einen Vorlauf von mindestens 10 Jahren.
 - Fusionskraftwerke müssen im Betrieb mehr Tritium durch sogenanntes Brüten erzeugen, als sie verbrauchen. Die dafür nötigen Technologien sind kaum entwickelt und erprobt.
 - Die Frage, ob eine Selbstversorgung von Kraftwerken mit Tritium technisch überhaupt möglich ist, sollte prioritär beantwortet werden.
 - Das aktuell vorgesehene Testprogramm reicht nicht aus, um die Tritiumselbstversorgung von DEMO zu erproben.
3. Werden privat finanzierte Start-ups deutlich schneller bei der Entwicklung von Fusionskraftwerken sein als öffentlich geförderte Vorhaben?
 - Eine Vielzahl an privat finanzierten Start-ups hat begonnen, alternative Ansätze für die Kernfusion zu erproben und damit den Weg zu einem Fusionskraftwerk zu ebnen.
 - Start-ups versprechen häufig, in 8 bis 10 Jahren Fusionsstrom ins Netz einspeisen zu können.
 - Zentrale technische Herausforderungen werden dabei allerdings oft ausgeblendet.
4. Wie wirtschaftlich kann Strom aus Kernfusion werden?
 - Konkrete Prognosen zu den Kosten der Erzeugung von Fusionsstrom können derzeit nur spekulativ sein.
 - Fusionskraftwerke werden einen hohen Investitionsbedarf und lange Kapitalbindung aufweisen.
 - Die Komplexität von Fusionskraftwerken dürfte dazu führen, dass Kostensenkungen durch Lerneffekte eher klein ausfallen werden.
 - Investitionen in Fusionskraftwerke werden in liberalisierten Energiemärkten schwer zu realisieren sein, wenn das damit verbundene unternehmerische Risiko nicht durch die öffentliche Hand abgemildert wird.

- Anforderungen des Netzbetriebs und der Strommärkte stellen für die ersten Fusionskraftwerke voraussichtlich sehr hohe Hürden dar.
5. Welche Rolle könnten Fusionskraftwerke in einem von erneuerbaren Energien geprägten Stromsystem spielen?
- Um die fluktuierende Einspeisung von Solar- und Windstrom auszugleichen, sind schnell regelbare Kraftwerke mit niedrigen Investitionskosten erforderlich.
 - Fusionskraftwerke können diese Aufgabe absehbar nicht erfüllen.
 - Als Pilotmärkte für Fusionsenergie könnten sich Anwendungen wie Meerwasserentsalzung, industrielle Prozesswärme oder Wasserstoffherstellung ggf. besser als der Stromsektor eignen.
6. Könnten Fusionskraftwerke helfen, die Energiearmut in Entwicklungsländern zu bekämpfen?
- Für Entwicklungsländer sind Fusionskraftwerke schwer zu realisieren.
 - Voraussetzungen sind u. a. gut ausgebaute Stromnetze, hohe Investitionen sowie spezialisiertes Know-how, die hohe Hürden für Entwicklungsländer darstellen.
7. Sind kleine Reaktoren besser als große?
- Kleine Reaktoren versprechen Vorteile, wie einen deutlich geringeren Investitionsbedarf sowie eine mögliche Kostenreduktion durch Serienfertigung.
 - Voraussetzungen für die Realisierung dieser Vorteile ist der verlässliche Absatz von größeren Stückzahlen.
 - Ob kleine Fusionskraftwerke technisch machbar sein werden, ist ungeklärt.
8. Welchen Beitrag können Fusionskraftwerke zum Klimaschutz leisten?
- Werden aktuelle Klimaschutzziele erreicht, kämen Fusionskraftwerke voraussichtlich zu spät, um einen Beitrag zur Dekarbonisierung der Energiewirtschaft zu leisten.
 - Bei einem starken langfristigen Anstieg des globalen Energieverbrauchs erhöhen sich die Marktchancen für Fusionsenergie.
9. Stehen benötigte Rohstoffe in ausreichender Menge zur Verfügung?
- Für Fusionskraftwerke werden hochspezialisierte Struktur- und Funktionsmaterialien benötigt. Die Beispiele Helium, Beryllium und Lithium illustrieren unterschiedliche mögliche Engpässe:
 - Helium als Nebenprodukt der Erdgasförderung könnte sich bei zurückgehender Erdgasförderung verknapfen.
 - Beryllium steht für ein breit angelegtes Fusionsausbauprogramm nicht in ausreichender Menge zur Verfügung.
 - Lithium ist zwar in genügender Menge verfügbar, allerdings könnten sich die fehlenden Produktionskapazitäten für das benötigte Isotop Li-6 als bedeutendes Hindernis erweisen.
10. Entstehen radioaktive Abfälle?
- Es wird angestrebt, dass beim Betrieb von Fusionskraftwerken keine langlebigen und hochradioaktiven Abfälle entstehen.
 - Ob dieses Ziel erreicht werden kann, hängt davon ab, welche Fortschritte bei der Materialentwicklung in den nächsten Jahren erzielt werden.
 - Anders als bei der Kernspaltung entstehen bei der Fusionstechnologie keine langlebigen, hochradioaktiven Abfälle aus abgebrannten Kernbrennstoffen.
 - Es besteht Bedarf an einer vorausschauenden und umfassenden Strategie für die Vermeidung und für die Entsorgung radioaktiver Abfälle.
11. Welche Risiken bestehen hinsichtlich der Weiterverbreitung von Kernwaffenmaterialien und Know-how?
- Tritium ist als Sprengkraftverstärker ein Bestandteil fortgeschrittener Kernwaffendesigns.
 - Um zuverlässig zu verhindern, dass militärisch relevante Mengen Tritium aus Fusionskraftwerken abgezweigt werden, ist ein äußerst hoher apparativer und administrativer Aufwand erforderlich.

- Die Erbrütung von waffenfähigem Plutonium in einer für Sprengköpfe ausreichenden Menge ist in Fusionskraftwerken technisch möglich.
- Die hierfür notwendigen Umrüstungen (etwa die Installation von uranhaltigen Brutblankets) sind leicht detektierbar. Voraussetzung ist, dass Überprüfungsmaßnahmen entwickelt und international umgesetzt werden.
- Experimentelle Einrichtungen der Laser-/Trägheitsfusion und der dazu entwickelten Simulationsmethoden sind geeignet, Know-how für die Entwicklung von Kernwaffen zu generieren.
- Nichtkernwaffenstaaten könnten auf diese Weise versuchen, die Einschränkung zur Entwicklung bzw. Weiterentwicklung von Kernwaffen durch den umfassenden Teststoppverbotsvertrag zu umgehen.

12. Wie könnte eine international verbindliche Regulierung aussehen?

- Es wird derzeit eine intensive Fachdebatte darüber geführt, welcher der verschiedenen international existierenden Regulierungsansätze für zukünftige Fusionskraftwerke sinnvoll und angemessen ist.
- Es ist allerdings kaum vorstellbar, dass eine transnationale gemeinsame Regulierung von Fusionskraftwerken erreicht werden kann. Denkbar ist hingegen, gemeinsame Schutzniveaus zu definieren.

1 Einleitung

Die jüngsten Fortschritte auf dem Gebiet der Plasmaphysik haben die Hoffnungen geschürt, dass die physikalischen Bedingungen für eine Nettoenergieerzeugung mittels Kernfusion in greifbarer Nähe liegen. Das öffentliche Interesse an Kernfusion ist aktuell enorm hoch. Weiter angefacht wurde es Ende 2022, als es der Forschungseinrichtung National Ignition Facility (NIF) in den USA erstmals gelang, ein Plasma mittels Laser-/Trägheitsfusion zu zünden, wobei mehr Fusionsenergie erzeugt wurde, als für die Aufheizung des Plasmas an Laserenergie eingesetzt worden war. Auch beim Konzept des Plasmaeinschlusses mithilfe von Magnetfeldern wurde Anfang 2023 ein wichtiges Zwischenziel erreicht: Mit der Anlage Wendelstein 7-X in Greifswald konnte ein heißes Plasma über 8 Minuten aufrechterhalten werden. Der Weg zu möglichen kommerziellen Kernfusionskraftwerken ist jedoch noch weit und erfordert langfristige Anstrengungen in der Grundlagen- und angewandten Forschung sowie in der technischen Entwicklung.

Der Hauptfokus der Fusionsforschung richtet sich seit Jahrzehnten auf das wissenschaftliche Verständnis und die Demonstration eines energiegeliegenden Plasmas. Obwohl auch hier noch einige Probleme zu lösen sind, besteht die begründete Hoffnung, dass dies in den nächsten Jahren gelingen kann.

Damit stellt sich die Frage mit neuer Dringlichkeit, welche Wissenslücken und Forschungsbedarfe darüber hinaus noch bestehen, damit tatsächlich ein Fusionskraftwerk gebaut werden kann, das über Jahre hinweg zuverlässig, sicher, kostengünstig und sauber Strom erzeugen kann. In dieser TA-Kompakt-Studie wird die Frage erörtert, welche Herausforderungen für den Bau und den Betrieb kommerzieller Fusionskraftwerke noch zu meistern sind und welche Eigenschaften Fusionskraftwerke voraussichtlich aufweisen werden. Dabei wird die Annahme zugrunde gelegt, dass die noch bestehenden offenen Forschungsfragen der Plasmaphysik geklärt und die Bedingungen für die Aufrechterhaltung eines energiegeliegenden Plasmas in absehbarer Zeit zuverlässig hergestellt werden können.

Die Studie konzentriert sich auf die Fusion der beiden Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium (D-T-Fusion), die in den letzten Jahrzehnten am intensivsten erforscht wurden. Der Hauptgrund dafür ist, dass die Fusionsbedingungen (Druck, Temperatur, Dauer des Einschlusses) bereits für D-T-Systeme sehr hohe technologische Hürden darstellen. Es bedurfte Jahrzehnte an intensiven Forschungsanstrengungen, um nun an der Schwelle der Realisierbarkeit zu stehen. Für alternative Konzepte (D-D, Proton-Bor¹) sind die Fusionsbedingungen nochmals um Größenordnungen extremer, sodass es ohne unvorhergesehene bedeutende Durchbrüche kaum vorstellbar ist, dass diese in absehbarer Zeit realisierbar sind.

Beim Überblick zur Art der Plasmaerzeugung werden die beiden am weitesten fortgeschrittenen Konzepte – magnetischer Einschluss und Laser-/Trägheitsfusion – in Kapitel 2 kurz vorgestellt. In der weiteren Diskussion im Hinblick auf mögliche Kraftwerke wird, wenn nicht anders angegeben, von der Fusion mittels magnetischen Einschlusses ausgegangen. Der Hauptgrund dafür ist, dass hier bereits ausgearbeitete Reaktordesigns vorliegen, die als Grundlage herangezogen werden können. Vergleichbares gibt es für die Laser-/Trägheitsfusion derzeit noch nicht.

Allerdings treten viele Charakteristika bei beiden Fusionsprinzipien gleichermaßen auf. Dazu gehören die Erzeugung eines hohen Flusses schneller Neutronen, die Herausforderung, aus diesen Neutronen die Nutzenergie bzw. den elektrischen Strom zu gewinnen, sowie die Notwendigkeit, den benötigten Brennstoff Tritium in der Anlage selbst zu erbrüten und zu prozessieren. Außerdem treten dieselben bzw. sehr ähnliche Fragestellungen hinsichtlich Reaktorsicherheit, Abfallmanagement, Regulierung und andere auf (BMBF Expertenkommission 2023, S. 15).

Beauftragung

Am 27. September 2023 fand im Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung eine Anhörung zum Thema „Kernfusion“ statt. Dort wurden vor allem die Chancen der Fusionsforschung und die Möglichkeiten der Forschungsförderung thematisiert (AfBFT 2023). Im Nachgang der Anhörung wurde das TAB beauftragt, komplementär zu der Anhörung Wissenslücken und Forschungsbedarfe auf dem Weg zu einem möglichen Kernfusionskraftwerk zu identifizieren. In Anlehnung an den 2002 vorgelegten TAB-Bericht „Kernfusion“ (TAB 2002) wurden die folgenden Themenbereiche dafür in den Fokus genommen:

- technische Machbarkeit

¹ So ist das Tripelprodukt (vereinfacht: Kennzahl, ab der ein Plasma Nettoenergie erzeugt) bei einer Temperatur von 100 Mio. K bei D-T etwa um einen Faktor 100 kleiner als bei D-D (Wikipedia o.J.b). Die Proton-Bor-Fusion hat aktuell einen Stand erreicht wie die D-T Fusion vor etwa 30 Jahren (MPG 2023).

- energiewirtschaftlicher Rahmen
- Umweltauswirkungen in einer Lebenszyklusanalyse
- soziale Nachhaltigkeit
- Weiterverbreitung von Kernwaffen
- Regulierungsfragen

Da für die Erarbeitung dieser TA-Kompakt-Studie eine knappe Bearbeitungszeit von lediglich 10 Arbeitswochen zur Verfügung stand, konnten nicht alle Themenbereiche umfassend analysiert, sondern teils nur schlaglichtartig beleuchtet und skizzenhaft dargestellt werden.

Methodisch stützt sich die vorliegende Studie auf eine Auswertung der wissenschaftlichen Fachliteratur sowie auf Interviews mit zehn Experten (Kap. 12.1). Diese wurden zum einen explorativ geführt, um Themen für die weitere Recherche zu identifizieren, und zum anderen dafür genutzt, um vorgenommene Einschätzungen zu validieren. Den Experten sei an dieser Stelle ausdrücklich dafür gedankt, dass sie ihr Wissen so zuvorkommend teilten. Die Verantwortung für die Zusammenführung der Informationen und Analysen der TA-Kompakt-Studie liegt beim Autor Dr. Reinhard Grünwald. Für die Aufbereitung der Abbildungen und die Erstellung des Endlayouts sei Brigitta-Ulrike Goelsdorf ganz herzlich gedankt.

2 Stand der Entwicklung

Die Verschmelzung (Fusion) zweier leichter Atomkerne, z. B. Wasserstoff, setzt enorme Mengen Energie frei. Dies ist der Prozess, der im Inneren der Sonne abläuft. Damit eine solche Fusion möglich wird, müssen die abstoßenden Kräfte zwischen den Kernen überwunden werden. Hierfür sind extrem hohe Temperaturen im Bereich einiger 100 Mio. Grad Celsius erforderlich. Unter solchen Bedingungen entsteht ein Plasma, d. h., Atomkerne und Elektronen bewegen sich frei voneinander.

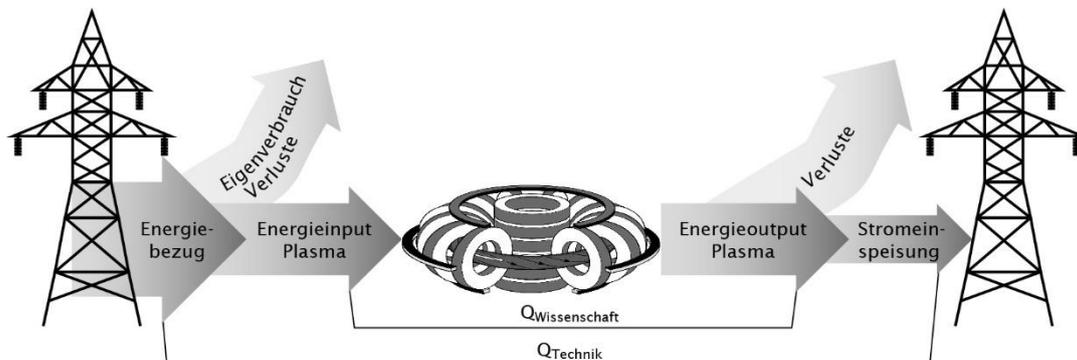
Derzeit wird eine Reihe verschiedener Konzepte entwickelt, mit denen eine kontrollierte Kernfusion technisch möglich sein könnte. Die beiden mit Abstand am weitesten fortgeschrittenen sind der magnetische Einschluss sowie die Laser-/Trägheitsfusion.

Beim *magnetischen Einschluss* werden die elektrisch geladenen Teilchen des Plasmas durch die Einwirkung starker magnetischer Felder bei geringer Dichte über Zeiträume von einigen Sekunden oder länger zusammengehalten. Die Magnetfelder werden mittels einer gezielten Anordnung von stromdurchflossenen Spulen erzeugt.

Bei der *Laser-/Trägheitsfusion* wird ein Brennstoffkugelchen von der Größe eines Pfefferkorns durch einen starken Laserpuls sehr schnell aufgeheizt und verdampft. Die Massenträgheit verhindert, dass die Atome sofort auseinanderfliegen. So können im Inneren des Kugelchens für einen kurzen Moment Fusionsbedingungen erzeugt werden. In anderen Worten: Es wird quasi eine winzige Wasserstoffbombe gezündet.

Ein wichtiges Kriterium für den Erfolg plasmaphysikalischer Experimente auf dem Weg zu einem Fusionskraftwerk ist der Energieverstärkungsfaktor Q , der das Verhältnis von erzeugter Energie zur hierfür eingesetzten Energie angibt. Eine Energiegewinnung entspricht $Q > 1$. Allerdings ist hierbei entscheidend, auf welche Ebene man sich bei der Betrachtung bezieht (Abb. 2.1).

Abbildung 2.1 Zwei Betrachtungsebenen beim Energieverstärkungsfaktor Q



Quelle: nach GAO 2023, schematische Grafik Tokamak: MPI für Plasmaphysik

Auf der Ebene der Plasmaphysik wird diejenige Energie betrachtet, die aus den Fusionsreaktionen stammt, und ins Verhältnis gesetzt zur Energie, die zur Aufheizung in das Plasma eingebracht wird. Das ist das sogenannte $Q_{\text{Wissenschaft}}$. Den Zustand, in dem gerade so viel Energie eingebracht wie generiert wird ($Q_{\text{Wissenschaft}} = 1$), nennt man Break-even. Das Forschungsziel $Q_{\text{Wissenschaft}} > 1$, das über viele Jahrzehnte hinweg verfolgt wurde, konnte erstmals im Dezember 2022 an der US-amerikanischen National Ignition Facility erreicht werden.

Für die Nutzung der Energie in einem Fusionskraftwerk ist dies allerdings bei Weitem nicht ausreichend, denn hier ist die gesamte Anlage in den Blick zu nehmen (Q_{Technik}). Letztlich soll ja ein Kraftwerk insgesamt mehr Strom erzeugen, als es Strom (oder andere Energie) für seinen Betrieb benötigt. Die für ein Kraftwerk notwendige Bedingung lautet somit $Q_{\text{Technik}} > 1$. Wegen der diversen Verlustprozesse (etwa bei der Erzeugung von Laserenergie aus Strom oder bei der Umwandlung von Wärmeenergie in Strom) bedeutet dies, dass im Plasma eine wesentlich höhere Energieverstärkung erreicht werden muss. Die Größenordnung für die Fusion mit magnetischem Einschluss beträgt beispielsweise $Q_{\text{Wissenschaft}} = 20\text{--}30$ und für die Laser-/Trägheitsfusion etwa $Q_{\text{Wissenschaft}} = 70\text{--}100$ (Atzeni/Callahan 2024, S. 48; BMBF-Expertenkommission 2023, S. 33; Hirsch 2021; Mori 2020, S. 6-3; Zuvela et al. 2014, S. 10).

In Aussagen von Forschenden über die Ziele bzw. Spezifikationen einer Versuchsanlage ist praktisch immer *Q_{Wis}*-senschaft gemeint. So beschreibt etwa Tim Luce, Leiter des ITER Department for Science & Operations, die Pläne bei ITER so (Reichert 2020, S. 895): „ITER wird vom ersten Plasma zu den Projektspezifikationen geführt, d. h. 500 MW Leistung mit einem Verstärkungsfaktor von 10 oder stationärer Betrieb mit einem Verstärkungsfaktor von 5.“²

Leider wird dieser Zusammenhang bei Weitem nicht immer hinreichend klar kommuniziert. In den Medien, aber auch bei Statements von Verantwortlichen aus der Fusionsforschung finden sich verbreitet missverständlich formulierte Äußerungen, die geeignet sind, den falschen Eindruck zu erwecken, dass in bestehenden Fusionsanlagen Nettoenergie erzeugt werden würde. Etwa diese: „In einem bahnbrechenden Experiment erzeugt die Kernfusion endlich mehr Energie als sie verbraucht.“³ (Riordon 2022) Dies wird noch dadurch verstärkt, dass im Englischen Power sowohl Leistung als auch elektrischer Strom bedeuten kann. Selbst wissenschaftliche Qualitätszeitschriften wie *Nature* sind vor diesem Irrtum nicht gefeit: „(ITER) wird voraussichtlich etwa 500 Megawatt Strom erzeugen.“⁴ (Castelvecchi/Tollefson 2016). Einige weitere drastische Beispiele hierfür werden in einem Video der Physikerin Sabine Hossenfelder (2021) präsentiert.

Kasten 2.1 Wenn über Kernfusion berichtet wird, ...

dann sind Superlative, Weltrekorde und Durchbrüche ein weit verbreitetes Stilmittel.

„Historischer Durchbruch in der Fusionsforschung: Laser haben die Kernfusion gezündet!“ (Fraunhofer ILT 2022)

„ITER: eine einzigartige internationale Kollaboration um die *Kraft der Sterne* nutzbar zu machen“⁵ (Bigot 2017)

„Neue Technologien könnten den ‚Heiligen Gral‘ in Reichweite bringen“⁶ (strategy& 2023)

„Entscheidender Durchbruch bei der Kernfusionsenergie“⁷ (Amos 2022)

„US-Kernfusionslabor tritt in *eine neue Ära* ein: ‚Zündung‘ gelingt immer und immer wieder.“⁸ (Tollefson 2023)

„Britischer Kernfusionsreaktor stellt *neuen Weltrekord* für Energieerzeugung auf.“⁹ (Sparkes 2024).

Nicht nur für Laien ist es bei dem zu beobachtenden üppigen Gebrauch reißerischer Sprache schwierig bis unmöglich einzuschätzen, welche tatsächliche Relevanz Meldungen dieser Art für die praktische Umsetzung von Fusionskraftwerken haben. Dies betrifft nicht nur die Berichterstattung in den traditionellen und in Onlinemedien, sondern auch die Sprache, die in Mitteilungen von Forschungseinrichtungen und deren Vertretern verwendet wird.

So wurde beispielweise vom Culham Centre for Fusion Energy (2024) jüngst gemeldet: „(JET) hat bewiesen, dass es in der Lage ist, zuverlässig Fusionsenergie zu erzeugen und hat gleichzeitig einen Weltrekord in der Energieerzeugung aufgestellt.“¹⁰ Erst ein zweiter Blick auf das zugrunde liegende Ereignis (Kap. 2.1) verrät, dass dieses für die Community der Plasmaforschung sicherlich interessant sein mag, für den weiteren Weg hin zu einem Fusionskraftwerk jedoch kaum nennenswerte Relevanz aufweist. Denn eine Nettoenergieerzeugung hat hier weder stattgefunden noch war sie überhaupt geplant.

Leider sind missverständliche Äußerungen wie diese keine Seltenheit. Wenn sich auf diese Weise in der breiten Öffentlichkeit ein verzerrtes Bild vom tatsächlichen Forschungsstand der Kernfusion festsetzt, wäre dies für

² „[...] taking ITER from First Plasma to project specifications such as 500 MW power with a gain of ten or steady-state operation with a gain of five.“ (Übersetzung TAB)

³ „In a breakthrough experiment, nuclear fusion finally makes more energy than it uses.“ (Übersetzung TAB)

⁴ „(ITER) is predicted to produce about 500 megawatts of electricity.“ (Übersetzung TAB)

⁵ „ITER: A unique international collaboration to harness the power of the stars.“ (Übersetzung u. Hervorhebung TAB)

⁶ „New technologies might bring the ‚Holy Grail‘ within reach“ (Übersetzung u. Hervorhebung TAB)

⁷ „Major breakthrough on nuclear fusion energy“ (Übersetzung und Hervorhebung TAB)

⁸ „US nuclear-fusion lab enters new era: achieving ›ignition‹ over and over“ (Übersetzung u. Hervorhebung TAB)

⁹ „UK nuclear fusion reactor sets new world record for energy output“ (Übersetzung u. Hervorhebung TAB)

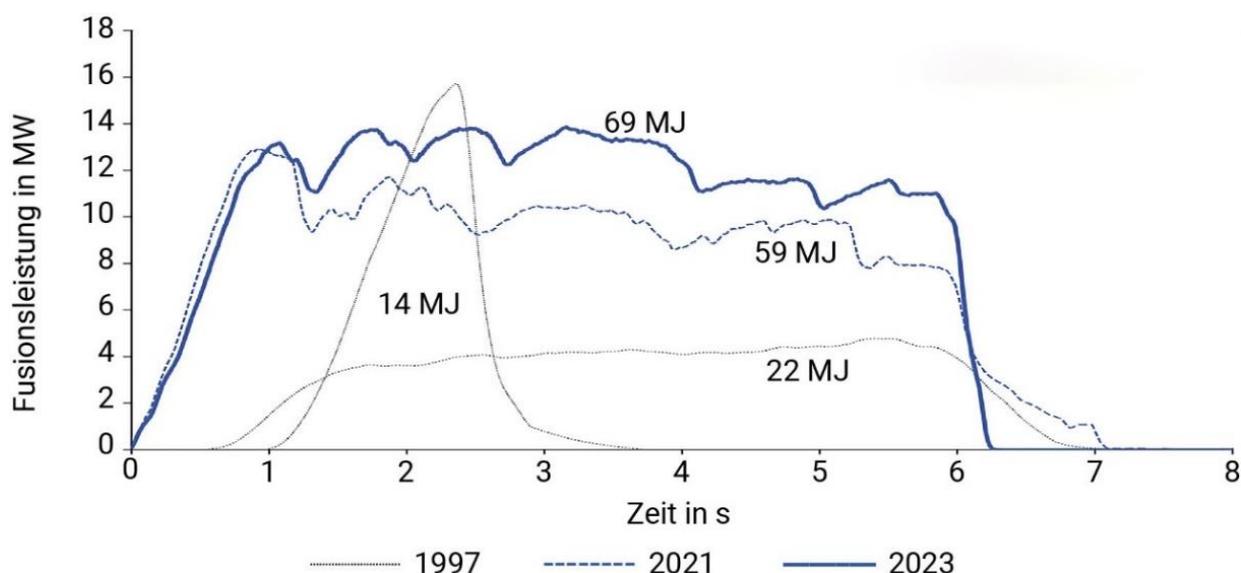
¹⁰ „(JET) has demonstrated the ability to reliably generate fusion energy, whilst simultaneously setting a world-record in energy output.“ (Übersetzung TAB)

eine rationale Meinungsbildung und Entscheidungsfindung in Gesellschaft und Politik in hohem Maße kontraproduktiv.

2.1 Fusion mit magnetischem Einschluss

In Bezug auf die Energieerzeugung mittels Fusion mit magnetischem Plasmaeinschluss wurden die bisher größten Erfolge an der Versuchsanlage JET (Joint European Torus) in England erzielt. JET wurde 1983 in Betrieb genommen. Erstmals wurde dort 1997 eine substanzielle Energiefreisetzung beobachtet: In einem Puls von 4 Sekunden Länge entstanden 21,7 MJ Fusionsenergie. Dies entsprach $Q_{\text{Wissenschaft}} = 0,67$. Über 2 1/2 Jahrzehnte konnte dies sukzessive gesteigert werden auf 69 MJ, die im Oktober 2023 erzielt wurden, unmittelbar vor der Stilllegung von JET Ende 2023 (Abb. 2.2). Leider wurde (zumindest bislang) kein Wert für Q angegeben (EU-ROfusion 2024). Beim 2021 erzielten damaligen Rekord von 59 MJ betrug $Q_{\text{Wissenschaft}} = 0,33$ (Gibney 2022).

Abbildung 2.2 In JET erzeugte Fusionsenergie 1997 bis heute



Quelle: nach UKAEA/EUROfusion (https://www.ipp.mpg.de/5405892/jet_rekord_2024?c=14226; 29.8.2024)

Die Forschung zu Fusionskraftwerken findet bisher als angewandte Grundlagenforschung statt. Institutionen der Plasmaforschung haben aber bereits einen Weg zur Realisierung und Kommerzialisierung von Fusionskraftwerken skizziert, dessen Schritte nach der im Bau befindlichen Anlage ITER über das Demonstrationskraftwerk DEMO und den Kraftwerksprototyp PROTO führen sollen (Kasten 2.2).

Kasten 2.2 Schritte auf dem Weg zu einem kommerziellen Fusionskraftwerk

ITER ist kein Kraftwerk, sondern eine Versuchsanlage für plasmaphysikalische Experimente. Ziel ist es, die physikalische Machbarkeit eines energieerzeugenden Plasmas nachzuweisen. Ein Nettoenergiegewinn (auf Anlagenebene) ist weder vorgesehen noch möglich. Der Bau von ITER wurde 2006 beschlossen, die Inbetriebnahme war ursprünglich für 2016 geplant. Nach Verzögerungen im Projektfortschritt wird derzeit ein aktualisierter Zeitplan für die Fertigstellung und Inbetriebnahme erstellt (Stand: März 2024).

DEMO ist das Konzept für ein Demonstrationskraftwerk, das ITER nachfolgen soll. Alle für einen Kraftwerksbetrieb benötigten Komponenten sollen so weit entwickelt sein, dass sie im Zusammenspiel so betrieben werden können, dass Strom produziert wird, ggf. aber nur über einen begrenzten Zeitraum (z. B. einige Minuten oder Stunden).

PROTO ist ein auf DEMO folgender Kraftwerksprototyp, der ein stabiles Design aufweisen soll, das nahe an die Betriebsparameter für ein kommerzielles Kraftwerk heranreicht. Dies betrifft u. a. Stromausbeute, Tritiumüberschuss, Standzeiten von Komponenten, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit. Die mit dem Betrieb von

PROTO gesammelten Erfahrungen sollen zu letzten inkrementellen Verbesserungen für die nächste Kraftwerksgeneration führen, die sich im Wettbewerb mit anderen Erzeugungstechnologien kommerziell durchsetzen soll.¹¹

Bei ITER handelt es sich – genau wie bei JET – um einen Tokamak, der die Form eines Torus besitzt, ähnlich einem Donut. Tokamaks können prinzipbedingt nur in Pulsen betrieben werden, da für den Plasmaeinschluss im Plasma selbst ein Strom fließen muss. Mit dem derzeit genutzten Prinzip der Induktion kann dieser Strom nur über einen begrenzten Zeitraum angetrieben werden. Diese Eigenschaft von Tokamaks ist für Kraftwerke ungünstig, da diese ja im Dauerbetrieb Strom erzeugen sollen. Ebenso ungünstig ist die Neigung zu Plasmainstabilitäten, die im schlimmsten Fall zu Disruptionen, einem plötzlichen Ausbrechen der Energie, führen können (Kasten 2.3).

Kasten 2.3 Plasmadisruptionen

Eine Disruption entsteht, vereinfacht gesprochen, wenn sich kleine Störungen der Plasmabedingungen aufschaukeln und zu einem plötzlichen Kontrollverlust führen. Die im Plasma gespeicherte thermische und magnetische Energie wird schlagartig freigesetzt. In einer Anlage der Größe von ITER sind dies etwa 350 MJ thermische und 400 MJ magnetische Energie (Lehnen et al. 2015, S.40). Wirkt auch nur ein Teil dieser Energie unkontrolliert auf Strukturen in der Plasmakammer ein, kann dies erhebliche Schäden verursachen. Die Energiemengen reichen beispielsweise aus, um mehrere Kilogramm Wandmaterial zu schmelzen oder zu verdampfen (Lehnen et al. 2015, S.40 f.).

Dies zu verhindern, ist seit Jahren ein wichtiges Forschungsfeld. Es geht darum, erstens instabile Plasmabedingungen zu vermeiden, zweitens die Bildung von Disruptionen rechtzeitig und zuverlässig vorherzusagen bzw. drittens die Wirkung von Disruptionen auf die Anlage abzumildern, indem die Energien anderweitig abgeführt werden (ITER Science Division 2023). Insbesondere bei der Steuerung von Parametern für ein stabiles Plasma sowie bei der Früherkennung von Disruptionen erhofft man sich vom Einsatz von KI-Systemen entscheidende Fortschritte (Degrave et al. 2022).

Vom Erfolg dieser Forschungsarbeiten hängt ab, ob ein späteres Fusionskraftwerk auf Basis des Tokamaks zuverlässig, sicher und effizient betrieben werden kann. Denn selbst wenn mögliche strukturelle Schäden durch Disruptionen verhindert werden können, wirken diese sich äußerst negativ auf die Energiebilanz aus. Der erhebliche Energieaufwand, um das Plasma zu erzeugen und zu heizen, geht im Fall einer Disruption ungenutzt verloren.

Diese beiden Nachteile weist das Konzept des Stellarators nicht auf. Dabei sorgen speziell geformte Magnetspulen für das passende Magnetfeld (Abb. 2.3). Ein Plasmastrom ist hier nicht erforderlich. Damit eignen sich Stellaratoren für den Dauerbetrieb. Der weltweit leistungsstärkste Stellarator ist die Experimentieranlage Wendelstein 7-X in Greifswald. Dort konnte im Februar 2023 ein heißes Plasma über 8 Minuten lang aufrechterhalten werden. Die zugeführte Heizleistung betrug 2,7 MW. Da bei Wendelstein nicht mit Tritium gearbeitet wird, entsteht bei den Experimenten keine relevante Menge an Fusionsenergie. Es ist geplant, in den nächsten Jahren die Heizsysteme sukzessive auszubauen und die Heizleistung auf über 25 MW zu steigern (Klinger et al. 2019). Zum Vergleich: Bei ITER, der die Machbarkeit eines energieerzeugenden Plasmas nachweisen soll, ist eine Heizleistung von 50 MW vorgesehen. Welches der beiden Konzepte – Tokamak oder Stellarator – sich für ein mögliches Kraftwerk als geeigneter erweisen könnte, ist gegenwärtig noch nicht geklärt. DEMO könnte demzufolge aus heutiger Sicht sowohl als Tokamak als auch als Stellarator ausgelegt werden.

¹¹ Die offizielle europäische Roadmap sieht vor, mit dem Fast-Track-Ansatz DEMO und PROTO zu einem Schritt zusammenzufassen, der einen glaubhaften Prototyp für ein kommerzielles Kraftwerk darstellen soll, ohne dass er selbst technisch und ökonomisch völlig optimiert ist.

Abbildung 2.3 In sich gedrehtes Spulensystem des Stellarators Wendelstein 7-X



Quelle: MPI für Plasmaphysik

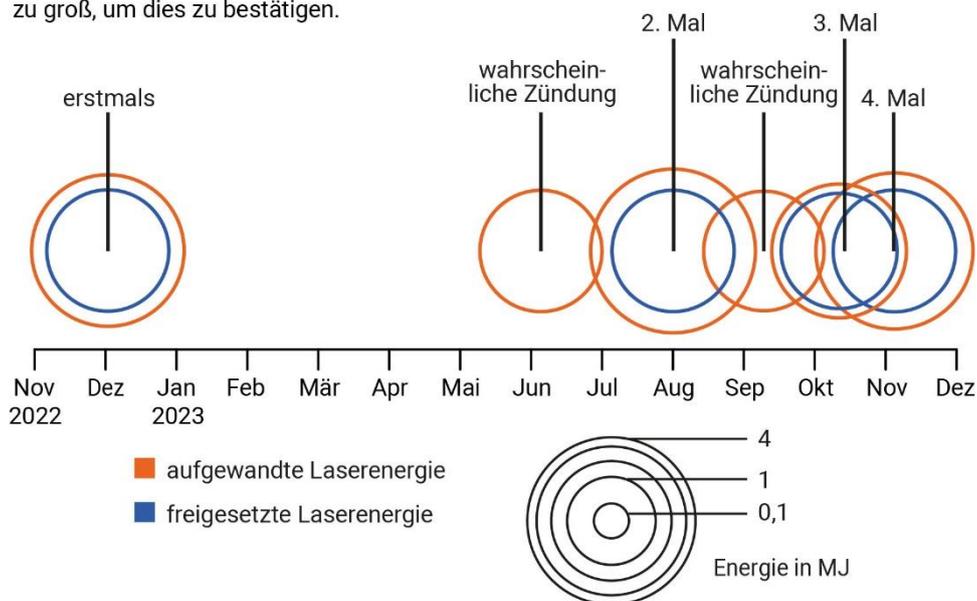
2.2 Laser-/Trägheitsfusion

Im Dezember 2022 wurde an der National Ignition Facility (USA) erstmals in einem Fusionsexperiment mehr Fusionsenergie freigesetzt (3,15 MJ), als zum Heizen des Plasmas mittels Laserstrahlen aufgewandt wurde (2,05 MJ), womit sich $Q_{\text{Wissenschaft}} = 1,54$ ergibt. In der Zwischenzeit konnte dieses Experiment einige Male erfolgreich wiederholt werden (Abb. 2.4).

Abbildung 2.4 Erfolgreiche Fusionsexperimente der NIF

Ein Jahr des Fortschritts

Das erste Experiment der National Ignition Facility, bei dem mehr Energie freigesetzt als verbraucht wurde, erreichte im Dezember 2022 die Zündung. Seitdem hat das Laserlabor dieses Kunststück mindestens dreimal wiederholt. Bei zwei weiteren Versuchen wurde diese Schwelle wahrscheinlich überschritten, aber die Unsicherheit bei den Messungen war zu groß, um dies zu bestätigen.



Quelle: nach Tollefson 2023

Kasten 2.4 National Ignition Facility

Nach Unterzeichnung des Vertrags über das umfassende Verbot von Nuklearversuchen (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty – CTBT) suchten die Atommächte andere Wege, um die Einsatzfähigkeit bestehender Kernwaffen sicherzustellen. In den USA befasste sich hiermit im Rahmen des Stockpile Stewardship Program zur Wartung und Aufrechterhaltung des Kernwaffenarsenals eine Reihe von Forschungseinrichtungen, darunter die NIF an der Kernwaffenforschungseinrichtung Lawrence Livermore National Laboratory in Kalifornien. Die primäre Mission der NIF ist es, das Verhalten von Materialien unter Bedingungen zu testen, wie sie bei einer Kernwaffenexplosion auftreten.

Als weitere Mission werden mit der dort betriebenen Laseranlage auch Versuche zur Energieerzeugung mittels Kernfusion durchgeführt. Der ursprüngliche Zeitplan fasste für die Erreichung des Ziels der Ignition, also $Q_{\text{Wissenschaft}} = 1$ das Jahr 2007 ins Auge (Kilkenny et al. 1999). Nachdem die Anlage erst 2009 fertiggestellt wurde (GAO 2000), starteten die Fusionsexperimente mit dem Ziel, bis 2012 die Bedingungen für Ignition zu erreichen, was 2022 schließlich gelang.

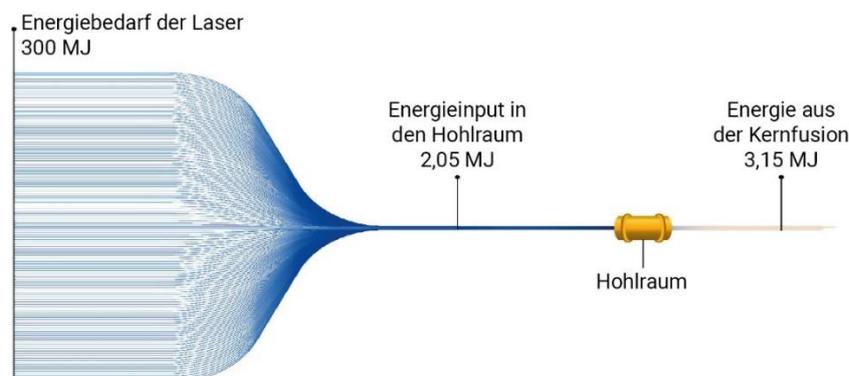
Damit Laser-Trägheitsfusion eine nutzbare Energiequelle werden kann, muss die Energieerzeugung im Plasma noch um einen Faktor 100 oder mehr gesteigert werden, denn die für den Betrieb der Laser aufgewandte Energie betrug etwa 300 Megajoule (Abb. 2.5). Selbst wenn man die Umwandlungsverluste von der Fusionsenergie in Strom vernachlässigt, ergäbe sich damit lediglich ein Q_{Technik} von etwa 0,01.

Vor der Entwicklung eines Konzepts, wie ein auf Laser-/Trägheitsfusion basierendes Kraftwerk aussehen könnte, muss die Energieausbeute deutlich angehoben und die Leistungsfähigkeit wichtiger Teilsysteme noch um viele Größenordnungen gesteigert werden, insbesondere die Wiederholrate und die Effizienz der Lasersysteme, aber auch die Konfiguration, mit der die Laserenergie in das Brennstoffkugelchen eingekoppelt wird (Helmholtz Task Force „Laserbasierte Fusionsforschung“ 2023, S. 1).

Das momentan verwendete Lasersystem schafft etwa einen Schuss pro Tag. Für ein Kraftwerk müsste dies auf eine Wiederholrate von 1- bis 10-mal pro Sekunde gesteigert werden. In der Zeit zwischen zwei Schüssen müsste die Vakuumkammer vollständig von den Überbleibseln der vorangegangenen Explosion befreit und das nächste Brennstoffpellet exakt in Position gebracht werden, damit es von allen Seiten gleichmäßig bestrahlt werden kann.

Darüber hinaus sind die Bedingungen, denen die Reaktorkammer eines Kraftwerks ausgesetzt werden würde, extrem herausfordernd: Jeder Schuss würde eine Energie freisetzen, die in etwa der Explosion von 11 kg TNT entspräche, mit einer entsprechend hohen Druckwelle und thermischen Wechselbelastung. Die Wand der Kammer müsste zusätzlich Pulsen von hochenergetischen Neutronen, Ionen und Röntgenstrahlen von einer beispiellosen Intensität widerstehen (Kap. 3.1). Welche Materialien diesen Bedingungen widerstehen könnten, ist derzeit völlig offen. Jüngst wurden hierfür z. B. flüssige Metalle ins Spiel gebracht (Pearson 2020, S. 10-6 f.).

Abbildung 2.5 Energiebilanz der weltweit ersten Zündung an der NIF



Quelle: nach GAO 2023, S. 14

Insgesamt betrachtet liegt somit die lasergestützte Fusion auf ihrem Weg hin zu einem Kraftwerk deutlich hinter den Plänen der magnetbasierten zurück (Helmholtz Task Force „Laserbasierte Fusionsforschung“ 2023, S. 1). Die bisher einzige bekannt gewordene Initiative zur Entwicklung eines Konzepts für ein kommerzielles Kraftwerk

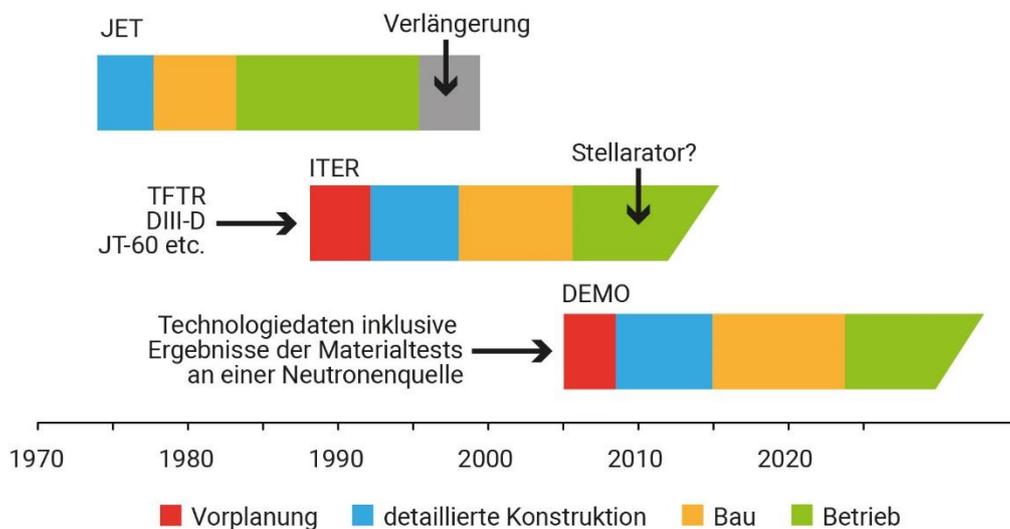
wurde ab 2008 am Lawrence Livermore National Laboratory unternommen. Das Projekt „LIFE“ (Laser Inertial Fusion Energy) hatte die Zielstellung, bis Mitte der 2020er Jahre ein Demonstrationskraftwerk mit 400 MW zu errichten. Allerdings wurde LIFE 2013 in aller Stille beendet (Kramer 2014).

Kasten 2.5 Zum Umgang mit Roadmaps und Kosten

Übertrieben optimistische Schätzungen von Zeit- und Kostenrahmen für die Entwicklung sind in der Geschichte der Kernfusion eher die Regel als die Ausnahme gewesen. Als Beispiel ist in Abbildung 2.6 die erste Roadmap für die weitere Entwicklung der Kernfusion via ITER und DEMO gezeigt, wie sie 1993 konzipiert wurde. Als das ITER Projekt 2007 formell begann, ging man von einer Inbetriebnahme 10 Jahre später aus, bei Gesamtkosten von 5 Mrd. Euro. In der letzten EUROfusion Roadmap von 2018 sind gar keine Jahreszahlen mehr angegeben (EUROfusion 2018), über eine Inbetriebnahme etwa in 2029 wird spekuliert. Die letzte offizielle Kostenschätzung beläuft sich auf 22 Mrd. Euro (Seife 2023), allerdings werden im schlimmsten Fall auch Kosten von über 50 Mrd. Euro befürchtet (Kramer 2014b).

Das Phänomen der überoptimistischen Kostenschätzungen tritt beileibe nicht nur in der Kernfusion auf, es ist auch anderswo häufig anzutreffen. Es ist eine regelmäßig auftretende Tendenz bei komplexen großtechnologischen Entwicklungsprojekten, dass im Laufe der Zeit die Projektdesigns reifer und detailreicher werden und damit zwar die Kostenunsicherheiten geringer werden, aber gleichzeitig die tatsächlichen Kosten erheblich ansteigen (MIT 2018, S. 73 f.).

Abbildung 2.6 Roadmap für die Entwicklung der Kernfusion nach den Vorstellungen von 1993



Quelle: nach Bickerton 1999, S.409

Zu einem rationalen Umgang mit diesem Phänomen gehört, dass zumindest ex post eine systematische Aufarbeitung der Gründe für die aufgetretenen Verzögerungen und Budgetüberschreitungen stattfindet. Vorteilhaft ist hier die Hinzuziehung externen Sachverständs. Nur so können aus den Fehlern der Vergangenheit sinnvoll Lehren für zukünftige Entscheidungen gezogen werden. Ebenso gehört hierzu ein hohes Maß an Transparenz. Kein gutes Beispiel ist in dieser Hinsicht etwa die Kommunikation (z. B. auf der Website) des ITER Projekts. Hier findet man praktisch ausschließlich Erfolgsmeldungen, Hinweise auf eingetretene Projektverzögerungen o. Ä. gibt es kaum.

3 Technik von Fusionskraftwerken: offene Fragen

Nach den jüngsten Erfolgen sowohl bei der Laser-/Trägheitsfusion als auch bei der Fusion mit magnetischem Einschluss scheint die Aufrechterhaltung eines für Kraftwerke nutzbaren energiereicheren Plasmas in greifbare Nähe zu rücken. Infolgedessen verlagert sich der Schwerpunkt des Interesses darauf, welche technologischen bzw. ingenieurwissenschaftlichen Entwicklungen noch zu leisten sind, damit Fusionskraftwerke gebaut und betrieben werden können.

Für dieses Kapitel wurden drei Themenbereiche herausgegriffen, die einerseits für einen Kraftwerksbetrieb essentiell sind und bei denen andererseits derzeit noch erhebliche Wissenslücken bzw. Forschungsdefizite bestehen. Dabei handelt es sich um

- die Entwicklung (fusions)kraftwerkstauglicher Materialien,
- das Tritiummanagement sowie
- Balance-of-Plant-Systeme.

Bei jedem dieser drei Themenbereiche wurden Aspekte identifiziert, die von zentraler Bedeutung für den Erfolg der Kraftwerksentwicklung sind bzw. die sich als Showstopper erweisen könnten, wenn sie nicht mit Nachdruck angegangen werden.

3.1 Entwicklung kraftwerkstauglicher Materialien

Eine der größten Herausforderungen für die praktische Umsetzung von Fusionskraftwerken ist die Entwicklung von Materialien, die mit den harschen und einzigartigen Bedingungen des Fusionsplasmas kompatibel sind. Von der erfolgreichen Materialentwicklung hängt ganz fundamental ab, ob Fusionskraftwerke überhaupt gebaut werden können. Gleichzeitig bestehen direkte Folgewirkungen für ihre Wirtschaftlichkeit und ihre Umwelteigenschaften. Wenn etwa seltene und teure Rohstoffe benötigt werden würden oder aber Komponenten häufig ausgetauscht werden müssten, weil die Materialien nicht haltbar genug sind, hätte dies negative Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit (Kap. 5). Die Umwelteigenschaften wären beeinträchtigt, wenn Materialien verwendet werden würden, die im Reaktorbetrieb stark radiotoxische Eigenschaften entwickeln (Kap. 8.1).

3.1.1 Erste Wand und Divertor

Diejenigen Komponenten eines Fusionskraftwerks, die dem Plasma zugewandt sind, müssen extremen Bedingungen widerstehen, vergleichbar denen auf der Sonnenoberfläche.

In der Kombination stellen die zu erfüllenden Kriterien eine enorme Herausforderung für die Materialentwicklung dar.

Die dem Plasma zugewandte innere Seite des Torus, sogenannte erste Wand, und der Divertor kommen mit dem Plasma direkt in Kontakt. Beim Divertor handelt es sich quasi um den Auspuff eines Fusionsreaktors, der das Plasma vom Fusionsprodukt Helium-4 (Asche) und anderen Verunreinigungen trennt. Die erste Wand und der Divertor müssen (Stork 2009, S. 43)

- extrem hohe Wärmebelastungen aushalten (stetig und Wechselbelastungen),
- beständig sein gegen Erosion beim Kontakt mit dem Plasma (durch Sputtern, das Herausschlagen von Teilchen aus dem Stoffgefüge) und chemische Wechselwirkungen,
- eine hohe Stabilität unter intensiver hochenergetischer Neutronenbestrahlung aufweisen und gleichzeitig dabei nicht oder nur gering radioaktiv werden sowie
- möglichst wenig Tritium (Kap. 3.2) in das Materialgefüge aufnehmen.

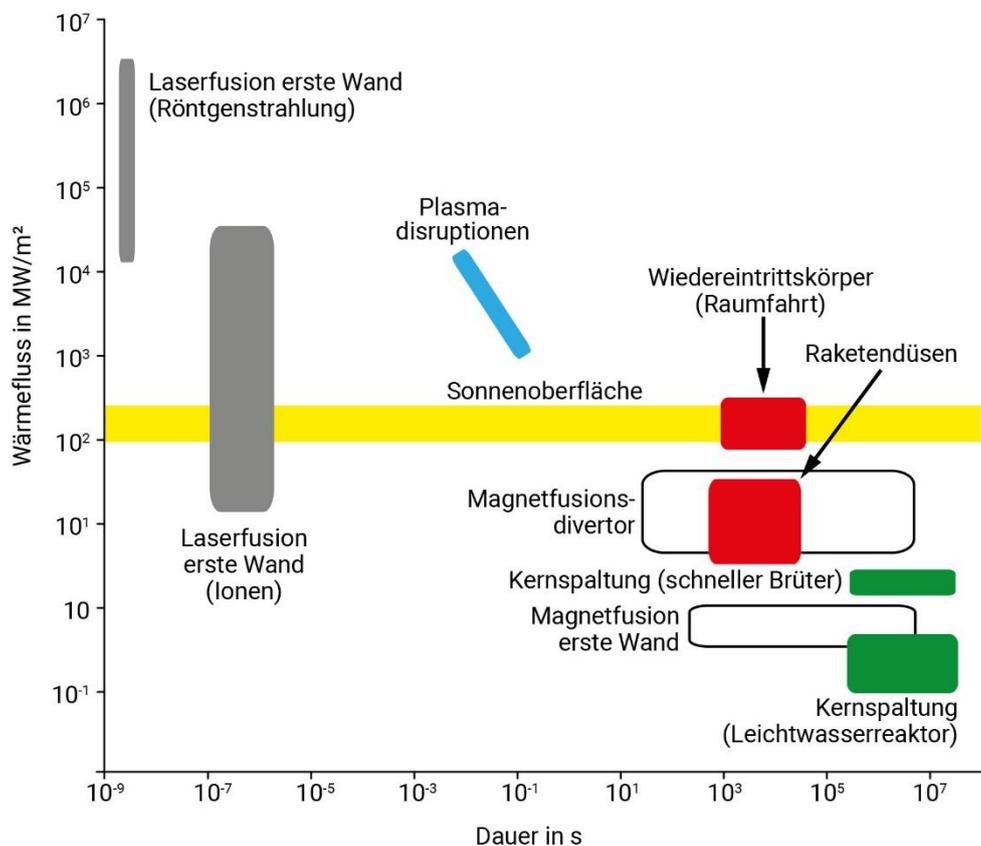
Die Erfüllung jedes einzelnen dieser Kriterien ist bereits für sich genommen anspruchsvoll, denn die Anforderungen liegen teilweise erheblich jenseits des gegenwärtigen Stands der Technik. In der Kombination stellen diese Kriterien eine exorbitante Herausforderung für die Materialentwicklung dar.

Zur Illustration ist in Abbildung 3.1 gezeigt, dass die Hitzeeinwirkung auf den Divertor, als thermisch am höchsten belastete Komponente eines Reaktors mit magnetischem Plasmaeinschluss (Tokamak oder Stellarator), am ehesten mit der auf das Hitzeschild einer Rakete vergleichbar ist. Allerdings muss der Divertor der Belastung viel

länger (bis zu 100-mal so lang) widerstehen. Sollte die Kontrolle über das Plasma im Zuge einer Disruption (Kapitel 2.3) verloren gehen und dessen Energie schlagartig an die erste Wand abgegeben werden, entstehen kurzzeitig Wärmeströme, die 10- bis 100-mal größer sind als die auf der Oberfläche der Sonne.

Noch extremer ist die Situation bei der Laser-/Trägheitsfusion. Für sehr kurze Pulse ist mit Wärmeflüssen zu rechnen, die 100 bis 10.000-mal größer sind als auf der Sonnenoberfläche. Dies liefert zumindest einen Teil der Erklärung, warum Kraftwerkskonzepte bei der Laser-/Trägheitsfusion denen mit magnetischem Einschluss um etliche Jahre hinterherhinken – trotz der wissenschaftlichen Erfolge hinsichtlich der Zündung eines Plasmas.

Abbildung 3.1 Wärmebelastung und Zeitdauer ihres Einwirkens für einige nukleare und andere extreme Bedingungen



Vergleich der Wärmebelastung von Komponenten bei Laser-/Trägheitsfusion (erste Wand), Fusion mit magnetischem Einschluss (erste Wand, Divertor) mit dem Stand der Technik bei Kern(spaltungs)reaktoren (Leichtwasserreaktoren und schnelle Brüter) sowie in der Raketentechnik (Hitzeschilde, Wiedereintrittskörper). Die waagrechte Linie bei 100 MW/m² illustriert die Bedingungen auf der Oberfläche der Sonne.

Quellen: nach Pearson 2020, S. 10-7, reproduziert aus Odette/Zinkle 2019

Die Auswahl von Kandidaten für Materialien, die potenziell widerstandsfähig genug gegen die auftretenden hohen thermischen Belastungen sind, ist per se nicht sehr groß. Sie wird zusätzlich eingeschränkt, da viele chemische Elemente für eine Verwendung ausgeschlossen sind, da sie unter Neutroneneinwirkung radioaktiv werden (Kap. 8.1). Auch schwerere chemische Elemente, d. h. solche mit einer höheren Ordnungszahl, sind ungünstig, da sie, wenn sie als Verunreinigungen ins Plasma gelangen, zu Energieverlusten im Plasma führen.

Aus diesen Gründen war für ITER ursprünglich für die erste Wand das Element Beryllium (Ordnungszahl 4) vorgesehen. Für den thermisch besonders hoch belasteten Divertor gibt es hingegen derzeit zu Wolfram keine Alternativen. Aufgrund von Erkenntnissen, dass diese beiden Materialien unter Plasmabedingungen nicht miteinander kompatibel wären (Mateus et al. 2024), ist nun Wolfram auch für die erste Wand vorgesehen. Gleichzeitig wurde ein System implementiert, das bei Bedarf einen Film aus Bor auf die Wolframoberflächen ausbringt (NEI 2023).

Ein Konzept, das zur Lösung der beschriebenen Herausforderungen für die Oberflächen mit direktem Plasmakontakt vorgeschlagen wurde, besteht darin, diese mit einer frei fließenden Schicht aus flüssigem Metall zu überziehen. Diese würde sich praktisch kontinuierlich selbst erneuern. Als geeignete Materialien werden z. B. Lithium, Zinn und deren Legierungen sowie Gallium untersucht (Smolentsev et al. 2019). Hier bestehen aber noch einige offene Fragen, etwa in Hinblick auf die Kompatibilität dieses Konzepts mit den Hochvakuumbedingungen und dem starken magnetischen Feld in der Plasmakammer (Pearson 2020, S. 10-8 ff.).

Kasten 3.1 Thermische Wechselbelastung von Materialien – Vergleich mit Kern(spaltungs)kraftwerken

Tokamaks können konzeptbedingt nur gepulst betrieben werden. Dies führt dazu, dass in den plasmanahen Bereichen regelmäßig thermische Wechselbelastungen auftreten. Diese beanspruchen die Materialien besonders stark, was an neuralgischen Stellen – beispielsweise an Schweißnähten von Kühlmittleitungen o. ä. – zu Rissen und Leckagen führen kann. Um eine Vorstellung von der Größenordnung der Problematik zu erhalten, werden hier zum Vergleich die Parameter herangezogen, für die deutsche Druckwasser-Kernkraftwerke ausgelegt wurden (TAB 2017, S. 9 f.): „Die Kernkraftwerke wurden bei ihrer Konstruktion für eine bestimmte maximale Anzahl an Zyklen ausgelegt. Im oberen Lastbereich – z. B. einer Absenkung der Leistung von 100 % der Nennleistung auf 80 % und wieder zurück (100-80-100) – ändern sich Kühlmitteltemperatur und -druck kaum. Daher sind die Kraftwerke für bis zu 100.000 solcher Zyklen ausgelegt. Im unteren Lastbereich steigt jedoch die Wechselbelastung der Komponenten an und die maximale Zyklenzahl nimmt stark ab. Der Zyklus 100-40-100 darf nur 12.000-mal durchfahren werden. Für den Zyklus Nennlast Nulllast- heiß Nennlast (100-0-100) wird 400-mal als maximal zulässig angegeben. Bei einer Lebensdauer des Kraftwerks von 40 Jahren entspräche dies 10 dieser Vorgänge pro Jahr.“

Geht man beispielsweise davon aus, dass der Puls eines Tokamaks in etwa einem Lastzyklus 100-80-100 entsprechen würde, so hätte dies bei einer angenommenen Lebensdauer von 40 Jahren zur Folge, dass die Pulse eine Mindestlänge von 3,5 Stunden haben müssten, damit die Maximalzahl von 100.000 eingehalten wird. Wenn die Zeit zwischen den Pulsen so lang wird, dass die Komponenten deutlich oder gar vollständig abkühlen, wären deutlich weniger Pulse möglich und die Komponenten müssten wahrscheinlich nach wenigen Jahren ausgetauscht werden.

3.1.2 Strukturmaterialien

Der intensive Beschuss mit Fusionsneutronen kann Materialien schädigen und radioaktiv werden lassen.

Um widerstandsfähige Materialien zu entwickeln und zu testen, sind Bestrahlungstests unabdingbar. Die hierfür geplante Versuchsanlage (IFMIF-DONES) ist dringend erforderlich.

Für Strukturmaterialien ist der intensive Beschuss mit hochenergetischen Neutronen die größte Belastung. Die Erfahrungen, die diesbezüglich etwa bei Reaktorgefäßen von Kernspaltungskraftwerken gesammelt wurden, sind nur äußerst begrenzt übertragbar, denn die Neutronenenergie beträgt hier weniger als 0,1 eV (thermische Neutronen). Die bei der D-T Fusion entstehenden Neutronen tragen demgegenüber mehr als 100 Mio. Mal mehr Energie (14 MeV). Entsprechend größer ist die zerstörerische Wirkung auf Materialien. Diese wird üblicherweise in dpa (displacements per atom) angegeben, also in der Anzahl der Stöße, denen jedes Atom im Festkörperverbund ausgesetzt ist. Bei DEMO ist über die Lebensdauer der Anlage von etwa 70 dpa auszugehen (Federici et al. 2019, S. 33). Dies führt dazu, dass sich die Materialeigenschaften erheblich verändern können (Versprödung etc.).

Der intensive Beschuss hat auch zur Folge, dass in der Mikrostruktur etwa von Stahl winzige Hohlräume entstehen können. Dadurch wird zum einen die Stabilität beeinträchtigt und Reparaturen können erschwert sein, da das Schweißen von neutrongeschädigtem Stahl aufgrund der Mikrohohlräume schwierig ist (Pearson 2020, S. 10-20). Zum anderen führen diese Hohlräume dazu, dass vermehrt Tritium aufgenommen wird, was für die Tritiumselbstversorgung eines Kraftwerks (Kap. 3.2) und für die spätere Entsorgung von Abfällen (Kap. 8.1) negative Auswirkungen hat.

Um zu vermeiden, dass unter Neutroneneinwirkung hochradioaktiv belastete Abfälle entstehen, kommen für Strukturmaterialien nur wenige chemische Elemente infrage (Kohlenstoff, Eisen, Wolfram, Tantal, eingeschränkt Silizium, Vanadium, Chrom, Yttrium), was die Auswahl bzw. Entwicklung etwa geeigneter Stahlsorten erheblich

einschränkt (Stork 2009, S. 31). Zurzeit wird als Strukturmaterial RAFM-Stahl (reduced activation ferritic/martensitic/ferritisch/martensitischer Stahl mit reduzierter Aktivierbarkeit)¹² favorisiert.

Für eine möglichst hohe thermodynamische Effizienz und damit Stromausbeute soll ein Reaktor bei möglichst hohen Temperaturen betrieben werden (z. B. 600 °C und mehr). Allerdings ist bei RAFM-Stahl die Betriebstemperatur auf etwa 500 bis 550 °C begrenzt, denn darüber setzt das thermische Kriechen ein, d. h., das Material beginnt sich unter Temperatureinwirkung zu verformen (Pearson 2020, S. 10-5 ff.).

Die Haltbarkeit der Materialien ist nicht nur eine technische Fragestellung, sondern auch von entscheidender Bedeutung für die ökonomische Machbarkeit bzw. Nachhaltigkeit von Fusionskraftwerken (Hesch/Stieglitz 2023, S. 43). Als Zielgröße werden für die Standzeiten der ersten Wand und der Divertoren oft 4 bis 5 Jahre angegeben. Danach müssen sie aufgrund von Strahlenschäden ausgetauscht werden, was in etwa 50 Tagen Wartungspause vollzogen sein soll (El-Guebaly/Malang 2009, S. 2076).

Kasten 3.2 IFMIF-DONES

Zur Bewertung, wie sich möglicherweise geeignete Materialien unter der intensiven Einwirkung von hochenergetischen Neutronen tatsächlich verhalten, ist die Durchführung von Versuchsreihen an Materialproben unverzichtbar. Hierfür soll eine Versuchsanlage errichtet werden (International Fusion Materials Irradiation Facility – DEMO Oriented Neutron Source – IFMIF-DONES/Internationale Anlage zur Bestrahlung von Fusionswerkstoffen – DEMO-orientierte Neutronenquelle). Als Standort ist Andalusien (Spanien) geplant. Eine endgültige Finanzierungszusage liegt noch nicht vor (Stand März 2024). Nach gegenwärtigem Zeitplan soll die Anlage ab 2034 in Betrieb gehen (IFMIF-DONES España o.J.).

Der Bedarf an einer Neutronenquelle zu Untersuchung von Materialien für Fusionskraftwerke wurde bereits vor beinahe 50 Jahren erkannt (Grand et al. 1976, S. 327). Das Konzept für IFMIF (seinerzeit noch ohne DONES) ist bereits über 20 Jahre alt. So hieß es schon in TAB (2002, S. 21): „Parallel zu ITER ist der Bau einer speziellen hochintensiven Fusionsneutronenquelle erforderlich, um niedrig aktivierbare Materialien zu entwickeln und zu testen. Das Konzept einer solchen Anlage, der International Fusion Materials Irradiation Facility, IFMIF, wurde in internationaler Kooperation ausgearbeitet und bei der International Energy Agency vorgelegt.“

Bereits beim aktuellen Zeitplan für die Inbetriebnahme ist der Zeitraum für Experimente knapp bemessen, denn „Bestrahlungstests der Materialien für DEMO [...] bis zu einer Bestrahlungsdosis von mindestens 80 dpa (displacements per atom) müssen rechtzeitig während der Entwurfsphase von DEMO erfolgreich vollendet sein, damit diese Materialien auch verwendet werden dürfen“ (Bradshaw 2001). Bei weiteren Verzögerungen bei IFMIF müssten die Pläne für den Bau von DEMO wohl weiter in die Zukunft gerückt werden.

3.1.3 Hochtemperatursupraleiter

Hochtemperatursupraleiter (HTS) könnten sich zu einem Gamechanger bei der Magnetfusion entwickeln.

Wie gut HTS-Materialien die Einwirkung von Fusionsneutronen tolerieren, ist noch eine offene Frage.

HTS sind Materialien, bei denen die supraleitende Eigenschaft bereits bei so hohen Temperaturen einsetzt, dass sie z. B. mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden können. Sie könnten in Magnetspulen eingesetzt werden und sich so zu einem Gamechanger bei der Fusion mit Magneteinschluss entwickeln. Sie versprechen höhere Magnetfelder und die Möglichkeit, ohne das teure und perspektivisch knappe Kühlmittel Helium auszukommen (Kap. 7). Ein höheres Magnetfeld erlaubt bessere Plasmabedingungen oder den Bau kleinerer Anlagen ohne Einbußen an Plasmaqualität.

Es gilt, noch einige technische Herausforderungen zu überwinden, etwa was die Produktion von Kabeln, Steckverbindungen und Magnetspulen betrifft. Deren Reifegrad bewegt sich momentan an der Schwelle zum kommerziellen Einsatz. Ob HTS für die erste Generation an Demonstrationsanlagen (vor allem DEMO) bereits zur Verfügung stehen werden, ist derzeit noch fraglich (Wilson et al. 2020, S. 8-14). Die HTS-Branche ist noch relativ

¹² Ferritisch/martensitisch heißen Edelstahlqualitäten mit hohem Chrom- und ggf. Kohlenstoffgehalt. Die reduzierte Aktivierbarkeit verdanken diese Stähle vor allem der strikten Reduktion des Gehalts von bestimmten Spurenmetallen wie Nb, Mo, Ni, Cu, Al, Ti, Si, Co (Gaganidze et al. 2018).

jung und das Produktionsvolumen und die Zuverlässigkeit der Produkteigenschaften sind noch nicht für den breiteren Einsatz ausreichend. So besteht etwa noch Forschungsbedarf bei thermomagnetischen Instabilitäten, die zu einem plötzlichen Verlust der Supraleitung in den Magnetspulen führen können (Quench), was im ungünstigen Fall dauerhafte Schäden an der Anlage zur Folge haben kann (Meschini et al. 2023, S. 6) (Kap. 8.2).

In einem für die Anwendung bei der Kernfusion wesentlichen Punkt besteht außerdem derzeit noch eine Wissenslücke: Wie verhalten sich die HTS-Materialien unter der intensiven Bestrahlung mit Neutronen? Die supraleitenden Eigenschaften (etwa die Stromtragfähigkeit) von HTS-Materialien hängen empfindlich von deren Kristallstruktur ab. Es ist bekannt, dass diese bereits bei viel geringeren Strahlungsschäden (in der Größenordnung von weniger als 10 dpa) degradieren können, als im Plasma-nahen Bereich eines Kraftwerks über seine Betriebsdauer hinweg zu erwarten sind (in der Größenordnung von 100 dpa). Experimentelle Untersuchungen dieses Phänomens sind apparativ aufwändig (extrem niedrige Temperaturen, hohe Ströme), aber dringlich erforderlich (Meschini et al. 2023, S. 6; Torsello et al. 2022).

3.2 Tritiummanagement

In einem künftigen Fusionskraftwerk in dem als (Kern-)Brennstoffe Deuterium und Tritium verwendet werden sollen, birgt der Umgang mit Tritium einige Herausforderungen. Im Gegensatz zu Deuterium, das natürlich vorkommt¹³ und in großen Mengen problemlos aus gewöhnlichem Wasser gewonnen werden kann, lässt sich Tritium in der Natur nur in Spuren nachweisen. Darüber hinaus zerfällt es radioaktiv mit einer Halbwertszeit von 12,3 Jahren. Chemisch verhält sich Tritium praktisch wie gewöhnlicher Wasserstoff, was bedeutet, dass es in sehr viele Materialien leicht diffundiert. Auf die damit einhergehenden möglichen Umweltrisiken wird in Kapitel 8.1.2 eingegangen. Weiterhin ist Tritium ein Stoff, der für den Bau von Kernwaffen bedeutsam ist. Implikationen für mögliche Risiken im Bereich der Weiterverbreitung von Kernwaffen werden in Kapitel 9.1 beleuchtet.

Ein Fusionskraftwerk benötigt ein Startinventar an Tritium, das extern beschafft werden muss (Kap. 3.2.1). Im weiteren Betrieb muss das Kraftwerk sich selbst mit Tritium versorgen. Dies geschieht durch das Brüten (Kap. 3.2.2).

3.2.1 Tritiumstartinventar

Weltweit steht nur eine sehr begrenzte Menge an Tritium für zivile Zwecke zur Verfügung. Für den Betrieb von ITER reicht sie aus. Aber bereits für DEMO ist das mit Stand von heute nicht gewiss.

Für zusätzliche Anlagen, die Tritium verbrauchen, steht sehr wahrscheinlich kein Tritium zur Verfügung.

Zusätzliche Tritiumquellen zu erschließen, ist schwierig und benötigt einen Vorlauf von mindestens 10 Jahren.

Im zivilen Bereich wird Tritium derzeit nur in sehr geringen Mengen genutzt. Pro Jahr werden geschätzt 100 g Tritium etwa als Tracer (diagnostisches Hilfsmittel) in Biologie, Chemie oder Medizin eingesetzt. Die gesamten, weltweit verfügbaren Tritiumreserven betragen etwa 26 kg. Aufgrund des radioaktiven Zerfalls von Tritium gehen unausweichlich pro Jahr 5,47 % der vorhandenen Menge verloren. Außerhalb von Kernwaffenprogrammen wird Tritium ausschließlich in Kanada (Darlington) und in etwas kleinerem Umfang in Wolsong (Südkorea) produziert. Dort werden Kernkraftwerke des Typs CANDU (Canadian Deuterium Uranium) betrieben, deren Kühlmittel Deuterium-haltiges Wasser ist. Fängt ein Deuteriumkern ein Neutron ein, wandelt er sich in Tritium um. Da sich beim Reaktorbetrieb im Laufe der Zeit Tritium im Kühlmittel anreichert, was Umwelt- und Gesundheitsrisiken birgt, wird es technisch aufwändig extrahiert. CANDU Reaktoren produzieren pro Jahr etwa 130 g Tritium je Gigawatt elektrischer Leistung. An beiden Standorten gemeinsam können so pro Jahr maximal etwa 3,3 kg Tritium gewonnen werden (Ni et al. 2013, S. 2423). Der Preis für ein Gramm bewegt sich in der Größenordnung von 30.000 bis 100.000 Euro (Willms 2008).

Die zukünftige Tritiumverfügbarkeit hängt somit entscheidend davon ab, wie lange und in welchem Umfang die CANDU-Reaktoren und die Tritiumextraktionsanlagen weiter betrieben werden bzw. ob neue gebaut werden (Abdou et al. 2021, S. 16). Die derzeitigen Pläne sehen vor, dass die Reaktoren ab etwa 2030 sukzessive außer Dienst gestellt werden.

¹³ Deuterium ist ein Isotop des Elements Wasserstoff, das zusätzlich zum Proton ein Neutron im Atomkern aufweist. Sein Anteil am natürlich vorkommenden Wasserstoff beträgt 0,015 %.

Kasten 3.3 Mengenvergleich: Tritium für militärische Zwecke

Die gesamte Menge Tritium, die von den USA im kalten Krieg (1955 bis 1984) zum Aufbau ihres Kernwaffenarsenals produziert wurde, beträgt etwa 175 kg (Cochran et al., S. 181). Nachdem der Bedarf an Tritium danach über viele Jahre hinweg aus außer Betrieb genommenen Kernwaffen gedeckt wurde, wurde ab 1997 die militärische Produktion wieder aufgenommen. Hierfür werden Lithium-haltige Absorberstäbe in Leichtwasserreaktoren genutzt (Watts Bar/Tennessee Valley Authority) (NRC 2005). Aktuelles Ziel ist, bis 2027 pro Brennelementezyklus (üblicherweise werden alle 18 Monate die Brennelemente gewechselt) in zwei Reaktorblöcken zusammen 2,8 kg Tritium zu gewinnen (Lynceans 2020). Ob dies gelingt, ist allerdings unklar, da wiederholt technische Schwierigkeiten dazu geführt haben, dass Produktionsziele nicht eingehalten werden konnten (GAO 2010) (u. a. ist mehr Tritium als geplant in den Kühlkreislauf des Kraftwerks migriert).

Um den vorgesehenen Deuterium-Tritium-Betrieb bei ITER mit Brennstoff zu versorgen, werden über einen Zeitraum von 18 Jahren insgesamt etwa 16,7 kg Tritium benötigt¹⁴ (Glugla et al. 2007, S. 474). Wie viel Tritium als Startinventar für ein sich daran anschließendes Demonstrationskraftwerk (DEMO) benötigt wird, wird von einer Vielzahl an Parametern bestimmt. Einige davon hängen vom wissenschaftlich-technischen Fortschritt der nächsten Jahrzehnte ab, sodass sie nur mit erheblicher Unsicherheit geschätzt werden können (z. B.: Welcher Anteil des zugeführten Tritiums wird im Plasma tatsächlich umgesetzt? Wie schnell kann das nicht verbrauchte Tritium aufbereitet und dem Prozess wieder zugeführt werden? Wie viel Tritium kann erbrütet werden, wie viel des Tritiums wird in Anlagenstrukturen eingelagert?). Das hat zur Folge, dass die Schätzungen für das Startinventar von DEMO weit auseinanderklaffen. Die Spanne reicht von 5 bis 8 kg im günstigsten Fall bis hin zu über 50 kg im schlechtesten (Abdou et al. 2021, S. 19; Pearson et al. 2018, S. 1144). Für den Aufbau einer künftigen Flotte kommerzieller Fusionskraftwerke kann grob von einem benötigten Startinventar von jeweils mindestens 10 kg ausgegangen werden.

Zwar ist es möglich, Tritium in kommerziellen Kernkraftwerken zu erbrüten (auf ähnlichem Weg wie bei der Produktion für militärische Zwecke; siehe Kasten), aber die technischen, regulativen, politischen¹⁵ und ökonomischen Hürden sind beträchtlich (Kovari et al. 2018, S. 2) und es wäre mit einem langen zeitlichen Vorlauf von 10 Jahren und mehr zu rechnen. Darüber hinaus ist es zwar denkbar, ein Fusionskraftwerk ohne oder nur mit geringem Startinventar an Tritium anzufahren, um dann mit den entstehenden Neutronen sukzessive immer mehr Tritium zu erbrüten (Konishi et al. 2017). Diese Start-up-Phase würde sich allerdings je nach Ausgangsmenge über viele Monate bis Jahre hinziehen und zu sehr hohen Kosten führen. Kovari et al. (2018, S. 1) beziffern diese Kosten auf etwa 2 Mrd. US-Dollar je kg Tritium, das auf diese Weise generiert wird.

Nach gegenwärtigem Stand ist die Tritiumversorgung von ITER gesichert, auch wenn sich weitere Verzögerungen im Zeitplan (im Bereich von etwa 5 Jahren) ergeben sollten. Voraussetzung ist, dass die Gewinnung von Tritium in CANDU-Kraftwerken mindestens im bisher geplanten Umfang weitergeführt wird. Für DEMO zeigen hingegen Modellierungen, dass dies auch unter eher optimistischen Annahmen nicht garantiert werden kann (Ni et al. 2013, S. 2425; Pearson et al. 2018). Das Versorgungsproblem verschärft sich insbesondere dann, wenn sich der Zeitplan für den Start von DEMO weiter verzögert. Überdies würde sich diese Problematik weiter zuspitzen, wenn zusätzliche Forschungs- oder Demonstrationsanlagen gebaut werden sollten, die Tritium benötigen. Für Überlegungen, nicht nur DEMO zu bauen, sondern jeweils ein solches Demonstrationskraftwerk in Europa, Nordamerika und Asien, wie sie beispielsweise von Tim Luce, Leiter des ITER Department for Science & Operations, angestellt wurden (Reichert 2020, S. 897), fehlt die materielle Grundlage, da hierfür nicht genug Tritium zur Verfügung steht.

Damit der Aufbau eines Fusionsprogramms sich selbst trägt, müsste somit das Tritium für ein darauffolgendes erstes kommerzielles bzw. Prototypfusionskraftwerk von DEMO produziert werden. Das bedeutet, dass bei DEMO nicht nur der Nachweis einer Nettostromproduktion, sondern darüber hinaus auch der Nachweis der Produktion eines Überschusses an Tritium von Betriebsbeginn an erbracht werden muss.

¹⁴ Ursprünglich geplant von 2017 bis 2035. Kovari et al. (2018, S. 3) sprechen von einer „inoffiziellen Schätzung“ von 12,3 kg.

¹⁵ Beispielsweise käme Indien mit seiner Flotte an 18 mit deuteriumhaltigem Wasser gekühlten Kraftwerken als Tritiumlieferant infrage. Allerdings ist Indien nicht Mitglied des Atomwaffensperrvertrags und betreibt Kraftwerke außerhalb des Safeguard-Regimes der IAEA, was Indien als Lieferland für die meisten Staaten praktisch ausschließen würde (Pearson et al. 2018, S. 1146).

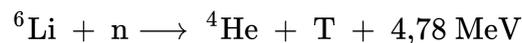
3.2.2 Tritiumselbstversorgung durch Brüten

Fusionskraftwerke müssen im Betrieb mehr Tritium durch Brüten erzeugen als sie verbrauchen. Die dafür nötigen Technologien sind noch kaum entwickelt und erprobt.

Die Frage, ob eine Selbstversorgung von Kraftwerken mit Tritium technisch überhaupt möglich ist, sollte prioritär beantwortet werden.

Das aktuell vorgesehene Testprogramm reicht nicht aus, um die Tritiumselbstversorgung von DEMO zu erproben.

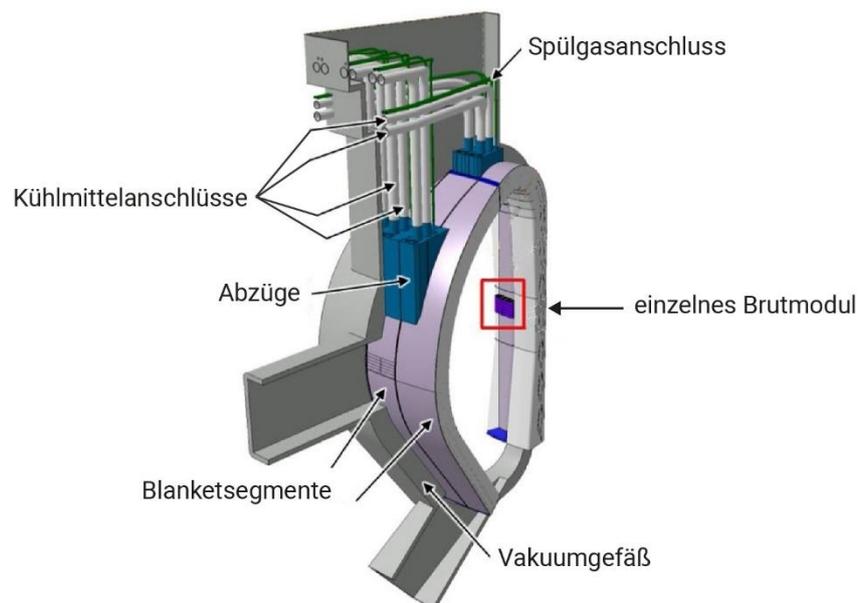
Ein Fusionskraftwerk mit einer thermischen Leistung von 1.000 MW, was in etwa einem mittelgroßen Kohlekraftwerksblock entspricht, benötigt pro Jahr etwa 56 kg Tritium (Abdou et al. 2021, S. 4). Da es keine plausible technische Möglichkeit für eine externe Tritiumversorgung in dieser Größenordnung gibt (Kap. 3.2.1), muss diese Menge im laufenden Betrieb eines Fusionskraftwerks selbst erzeugt werden. Die hierfür vorgesehene Methode ist das Brüten, bei der die bei der Kernfusion (von D mit T) entstehenden Neutronen genutzt werden. Diese sollen von Lithium-6-Kernen eingefangen werden, die anschließend in Tritium und Helium-4 zerfallen.



Da jede D-T-Fusionsreaktion genau ein Neutron erzeugt und für jede Brutreaktion eines gebraucht wird, um wieder einen Tritiumkern zu erhalten, müssen einerseits möglichst alle Neutronen genutzt werden und andererseits zum Ausgleich unvermeidlicher Verluste im Reaktor zusätzliche Neutronen produziert werden. Hierfür sollen Neutronenvervielfacher eingesetzt werden, üblicherweise Beryllium oder Blei, deren Atomkerne nach dem Einfang von einem Neutron zwei Neutronen emittieren.

Das Brüten geschieht im Blanket, das eine Komponente darstellt, die für einen funktionierenden Reaktorbetrieb von essenzieller Bedeutung ist (Federici 2023).

Abbildung 3.2 Konzept eines Blankets für DEMO



Ausschnitt aus einer Konstruktionszeichnung eines Sektors des DEMO Blankets mit Stützstruktur und Kühlmittel- und Spülgasanschlüssen

Quelle: nach Hernández et al. 2020, S. 2

Die bei der Fusionsreaktion freigesetzten Neutronen entweichen aus der Plasmazone ungestört vom Magnetfeld (da sie elektrisch neutral sind) gleichmäßig in alle Raumrichtungen. Damit keine Neutronen ungenutzt verloren gehen, muss das Blanket daher die Plasmakammer möglichst vollständig und lückenlos umgeben. Zwischen

Plasma und Brutzone sollte so wenig Materie wie irgend möglich liegen, um den Neutronenverlust etwa durch Einfang in Strukturmaterial zu minimieren. Das bedeutet, dass die erste Wand (Kap. 3.1.1) so dünn wie irgend möglich (im Idealfall nur wenige Millimeter dick) sein sollte. Das Blanket muss mindestens 1 bis 1,5 m dick sein, um möglichst alle Neutronen darin abzustoppen. Bei der D-T-Fusionsreaktion tragen die entstehenden Neutronen etwa 80 % der freigesetzten Energie. Daher muss das Blanket neben der Brutfunktion auch noch die Funktion der Umwandlung dieser Energie in Wärme und deren Abtransport erfüllen.

Das Brutblanket eines Kraftwerks muss in regelmäßigen Abständen ausgetauscht werden, da sein Strukturmaterial durch die Fusionsneutronen geschädigt wird. Daher ist ein modularer Aufbau vorgesehen. Jedes Modul soll aus Stahlelementen bestehen, die mit Brut- und Neutronenervielfacher gefüllt sind. Es ist von einem Gewicht von mehreren 10 t auszugehen (Hesch/Stieglitz 2023, S. 43). Die Demontage sowie die Überführung aus dem Vakuumgefäß hinaus müssen aufgrund der Radioaktivität der Komponenten ferngesteuert vonstattengehen (Kap. 3.3). Der Entwicklungsbedarf ist bei allen genannten Technologien zur Tritiumbereitstellung erheblich.

Für die Selbstversorgung und die Bereitstellung von Tritium als Startup Inventar weiterer Kraftwerke ist es zwingend erforderlich, dass im Betrieb mehr Tritium erbrütet als verbraucht wird. Das Verhältnis von produziertem zu verbrauchtem Tritium wird als Tritiumbrutverhältnis (Tritium Breeding Ratio – TBR) bezeichnet. Wenn es nicht gelingt, ein $TBR > 1$ zu erreichen, kann ein Fusionskraftwerk nicht sinnvoll betrieben werden.

Wie zuvor ausgeführt, muss bereits DEMO zwingend ein $TBR > 1$ erreichen. Bislang beruhen die Abschätzungen dazu, ob dies erreicht werden kann, lediglich auf modellgestützten Berechnungen. Diese sind jedoch mit erheblichen Fehlermargen behaftet, u.a. deshalb, weil grundlegende kernphysikalische Daten nicht in der erforderlichen Genauigkeit vorliegen. Die Unsicherheiten bleiben solange bestehen, bis Tests in ausreichend großem Maßstab durchgeführt wurden (Sawan/Abdou 2006; El-Guebaly/Malang 2009, S. 2074).

Ob die Zielmarke von $TBR > 1$ überhaupt erreicht werden kann, hängt von einer Vielzahl an technologischen Parametern ab. Einen wesentlichen Einfluss haben vor allem:

- der Anteil des ins Plasma eingebrachten Tritiums, der tatsächlich reagiert;
- die Verfügbarkeit des Reaktors (prozentualer Anteil der Betriebsstunden an den gesamten Stunden);
- die Menge an Tritiumreserve für Zeiten, in denen z. B. die Tritiumgewinnung aufgrund technischer Probleme stockt.

Berechnungen von (Abdou et al. 2021) zeigen, dass nur in einem kleinen Parameterfenster das Kriterium $TBR > 1$ erreicht werden kann. Insbesondere die Verfügbarkeit des Reaktors spielt dabei eine wesentliche Rolle. Ist diese etwa kleiner als 10 %, ist $TBR > 1$ komplett ausgeschlossen. Für gute Aussichten auf Erreichbarkeit von $TBR > 1$ müsste die Verfügbarkeit bei mindestens 50 % liegen. Ein weiteres Ergebnis ist, dass $TBR > 1$ bereits dann nicht zu erreichen ist, wenn eine Reserve an Tritium vorgesehen wäre, um den Reaktorbetrieb für 24 Stunden aufrecht erhalten zu können. Daraus folgt, dass sehr hohe Ansprüche an die Zuverlässigkeit und schnelle Wartbarkeit aller Komponenten des Tritiumkreislaufs gestellt werden müssen, da Ausfälle nur über wenige Stunden hinweg toleriert werden können.

Kasten 3.4 Achillesferse Verdopplungszeit

Als Verdopplungszeit wird die Zeitspanne bezeichnet, in der ein Fusionskraftwerk eine Überschussmenge Tritium erbrüten kann, die ausreicht, um ein neues Fusionskraftwerk zu starten (El-Guebaly/Malang 2009, S. 2076). Kurze Verdopplungszeiten etwa in der Größenordnung von 1 bis 3 Jahren wären erforderlich, damit eine zügige Marktdiffusion von Fusionskraftwerken weltweit nicht durch die mangelnde Verfügbarkeit von Tritium ausgebremst werden würde. Ergebnisse der Berechnungen von Abdou et al. (2021, S. 41) zeigen, dass es mit den heute erreichbaren physikalischen und technischen Parametern und Bedingungen kaum möglich sein wird, solch kurze Verdopplungszeiten zu erreichen. Solange dieser Einwand nicht ausgeräumt werden kann, bleibt die Frage der Machbarkeit und ökonomischen Tragfähigkeit von Fusionskraftwerken offen (Pearson et al. 2018, S. 1146).

Beim Umgang mit Tritium existiert derzeit eine beträchtliche Lücke zwischen den bestehenden und in nächster Zeit geplanten Fusionsexperimenten, die lediglich mit einigen wenigen Gramm Tritium arbeiten, und der Menge von 100 kg pro Jahr und mehr, die im Kraftwerksbetrieb zu erwarten sind. Hierfür müssen Technologien, die derzeit jeweils nur auf kleine Chargen ausgelegt sind, für einen kontinuierlichen, praktisch unterbrechungsfreien

Dauerbetrieb weiterentwickelt werden. Aus Gründen des Umwelt- und Gesundheitsschutzes und den damit verbundenen Bedingungen für eine Zulassung (Kap. 10) müssen außerdem die Emissionen von Tritium im Betrieb deutlich gegenüber dem heutigen Stand der Technik verringert werden, etwa um den Faktor 10 bis 100 (Klein 2020, S. 3, 4).

Das Testprogramm mit Brutblankets in ITER ist aufgrund seines begrenzten Umfangs (so sollen etwa lediglich 2 g Tritium pro Jahr erbrütet werden) nicht ausreichend, um mit hinreichender Sicherheit festzustellen, ob bestimmte Blanketkonzepte für eine Tritiumselbstversorgung in DEMO geeignet sein werden (El-Guebaly/Malang 2009, S. 2081). Hierfür sind weitere Forschung, Entwicklung und praktische Erprobung von Komponenten und deren Zusammenspiel erforderlich.

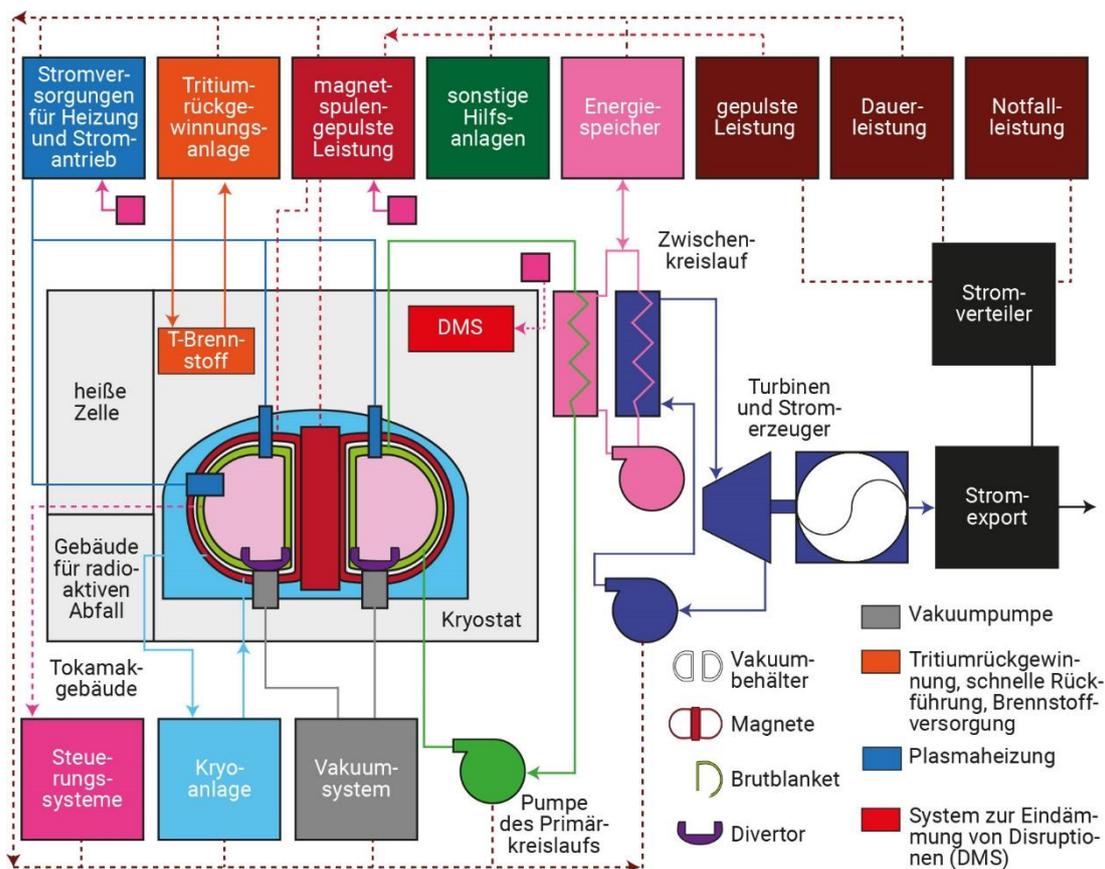
3.3 Balance-of-Plant-Systeme/Integration in ein Gesamtsystem

Die Integration des komplexen Zusammenspiels aller Teilsysteme in ein funktionierendes Gesamtsystem ist eine der größten Herausforderungen bei der Entwicklung von Fusionskraftwerken.

Um das Entwicklungsrisiko für DEMO zu minimieren, wäre die Erprobung dieses Zusammenspiels in einer Testanlage überschaubarer Größe hilfreich.

Mit Balance of Plant (BoP) (Balance der Anlage) bezeichnet man alle unterstützenden Komponenten und Hilfsysteme eines Kraftwerks. Dies sind sämtliche Systeme, in denen Energie umgewandelt, weitergeleitet und/oder verbraucht wird, beispielsweise Kühlsysteme, Wärmetauscher, Pumpen (z. B. für Vakuum, Helium, primäre und sekundäre Wärmeträgermedien), Plasmaheizung, aber auch die Systeme zur Tritiumgewinnung und Brennstoffkonditionierung und vieles mehr. Einen anschaulichen Eindruck der Vielfalt und Komplexität der BoP-Systeme eines Fusionskraftwerks bietet Abbildung 3.3 am Beispiel von DEMO.

Abbildung 3.3 Vereinfachtes Blockdiagramm der BOP-Systeme von DEMO



Quelle: Federici et al. 2017, S. 4

All diese Systeme tauschen untereinander Energie, Stoffe und Daten aus. Für einen reibungslosen Kraftwerksbetrieb muss nicht nur jedes einzelne von ihnen zuverlässig funktionieren, sondern auch ihr Zusammenspiel muss präzise ausbalanciert sein. Verglichen mit anderen Kraftwerkstypen – etwa Kern(spaltungs)kraftwerken – weisen Fusionskraftwerke eine enorm hohe Komplexität auf. Die Herausforderung besteht darin, das Gesamtsystem so zu gestalten, dass es gleichzeitig leistungsstark, zuverlässig, sicher und kostengünstig ist.

Gegenwärtig befinden sich einige der zentralen BoP-Systeme noch in einem frühen Entwicklungsstadium, darunter etwa die Systeme zur Tritiumgewinnung und -behandlung, das primäre Kühlsystem (das die Fusionsenergie in Wärme umwandelt und abführt) und die Systeme zur Behandlung radioaktiver Abfälle. Andere sind zwar im Prinzip Stand der Technik, müssen aber im Hinblick auf die speziellen Anforderungen der Fusion angepasst werden.

Insbesondere die im Betrieb entstehende Radioaktivität stellt eine große Herausforderung dar. Sie hat zur Folge, dass sämtliche Wartungs-, Instandhaltungs- und Reparaturarbeiten mittels robotischer Fernhandlungssysteme ausgeführt werden müssen. Diese müssen in der Lage sein, große Nutzlasten aufzunehmen (etwa die mehrere 10 t schweren Blanketmodule), in engen Räumen zu manövrieren sowie Komponenten innerhalb des Reaktors zu inspizieren, zu entfernen (schneiden), wieder anzubringen (schweißen) und zu reinigen (etwa Staub aus der Plasmakammer zu entfernen). Die Ausrüstung muss eine hohe Verfügbarkeit für die Durchführung der routinemäßigen Wartung aufweisen und es muss möglich sein, unerwartet ausgefallene Komponenten auszutauschen und Reparaturen (auch an unzugänglichen Stellen) schnell durchzuführen.

Die Geschwindigkeit und Leistungsfähigkeit dieser Fernbedienungssysteme wirken sich direkt auf die Verfügbarkeit eines Kraftwerks aus. Sie sind damit Schlüsselfaktoren für den wirtschaftlichen Erfolg oder Misserfolg eines kommerziellen Fusionskraftwerks (Pearson 2020, S. 10-19).

Kasten 3.5 Beispiel für Störfälle, die mit robotischen Systemen zu meistern wären

Beim europäisch-japanischen Forschungsprojekt JT-60 SA handelt es sich um den derzeit größten und fortschrittlichsten Tokamak, der weltweit in Betrieb ist (bis zur Inbetriebnahme von ITER). Im März 2021 trat beim Hochfahren ein Defekt an der elektrischen Isolation der Magnetspulen auf. Dieser führte zu Lecks im Heliumsystem. Fehlersuche und Reparaturarbeiten nahmen über 2 Jahre in Anspruch. Im Oktober 2023 konnte das erste Plasma erzeugt werden (JT-60SA 2024; Fusion For Energy 2022). Ein ähnlicher Störfall, der im Fall des Betriebs mit Tritium allein mit robotischen Systemen behoben werden müsste, könnte leicht das kommerzielle Aus für ein Kraftwerk bedeuten.

3.4 Überblick zu Entwicklungsbedarfen und Fazit

Um die erheblichen Entwicklungsrisiken auf dem Weg zu DEMO zu minimieren, wäre der Bau einer kleinen Fusionsanlage als Testplattform für die Technologieentwicklung und Systemintegration zu erwägen.

In der etablierten Roadmap zur Entwicklung von Fusionskraftwerken von ITER zu DEMO und darüber hinaus wird ein enormer Entwicklungssprung vorausgesetzt. Während mit ITER die physikalische Machbarkeit eines energieerzeugenden Plasmas nachgewiesen werden soll, sollen bei DEMO im Prinzip alle für ein Kraftwerk erforderlichen Komponenten einzeln und im Zusammenspiel funktionieren. Wie in diesem Kapitel ausgeführt, bezieht sich der Entwicklungsbedarf auf die folgenden Punkte:

Materialentwicklung

Die Entwicklung von Materialien, die die hohen Wärme- und Neutronenbelastungen eines Fusionskraftwerks aushalten, ist eine wesentliche Herausforderung. Eine Testanlage (IFMIF-DONES), mit der die Eigenschaften von Materialien unter der Einwirkung von schnellen Neutronen untersucht werden können, ist zwar in einem fortgeschrittenen Planungsstadium. Wenn ihr Bau jedoch nicht mit Nachdruck weiter vorangetrieben wird, werden negative Auswirkungen auf den Zeitplan des Baus von DEMO kaum zu vermeiden sein. Allerdings können in einer Anlage wie IFMIF-DONES nur relativ kleine Materialproben untersucht werden (mit einem Volumen von etwa einem halben Liter) (Federici 2023, S. 3). Damit können Effekte, die sich in größeren Volumen bzw. in ganzen Bauteilen manifestieren, beispielsweise an Stellen, wo unterschiedliche Materialien in Kontakt stehen, nicht untersucht werden.

Tritium

Trotz seiner entscheidenden Bedeutung für die Entwicklung von Fusionskraftwerken ist der technologische Reifegrad des Brutblankets für die Gewinnung von Tritium noch sehr gering. Bisher existieren zwar mehrere Konzepte, aber noch kein Prototyp wurde gebaut oder getestet. Das (begrenzte) Testprogramm für Brutblankets bei ITER wurde im Zuge der Restrukturierung noch weiter reduziert. Dieses Programm reicht nicht aus, um nachzuweisen, ob eine Tritiumselbstversorgung mit den bestehenden Konzepten erreicht werden kann. Thermomechanische Eigenschaften und das Verhalten unter weiteren kraftwerksrelevanten Bedingungen (hohes Magnetfeld, Neutronenfluss u. a.) können in einer Testanlage wie IFMIF-DONES nicht untersucht werden (Federici 2023). Auch aus regulatorischer Sicht ist es fraglich, ob eine Genehmigung für den Betrieb einer DEMO-Anlage erteilt werden könnte, in der ein kerntechnisches System wie das Brutblanket eingesetzt wird, das nicht zuvor unter den entsprechenden Bedingungen getestet und qualifiziert wurde (Federici 2023, S. 9).

Integration in ein Gesamtsystem

Alle Einzelsysteme, die individuell derzeit noch sehr unterschiedlich weit in ihrer Entwicklung sind, in ein funktionierendes Gesamtsystem zu integrieren, das sich durch eine hohe Komplexität und vielfältige Wechselwirkungen zwischen den Teilsystemen auszeichnet, ist nach Experteneinschätzung wahrscheinlich die größte aller Herausforderungen auf dem Weg zu einem funktionierenden Fusionskraftwerk (Hesch/Stieglitz 2023, S. 44).

Die angesprochenen Forschungslücken führen zu Entwicklungsrisiken für DEMO, die als hoch bzw. von manchen Experten als unannehmbar hoch eingeschätzt werden (Federici 2023, S. 9). Für ein Multi-Milliarden-Euro-Projekt wie DEMO sollten alle sinnvollen Maßnahmen zur Begrenzung des Projektrisikos getroffen werden. Eine Möglichkeit hierfür wäre, im Vorfeld eine kleine Fusionsanlage zu bauen, die ausreichend Neutronenfluss und Energieumsatz aufweist, um kraftwerksrelevante Bedingungen zu generieren. An die Plasmeeigenschaften müssten hierfür keine besonders hohen Anforderungen gestellt werden. Eine solche Anlage könnte als Testplattform für die Entwicklung und Qualifizierung einzelner Komponenten und für ihr Zusammenspiel dienen. Vorgeschlagen wurde eine derartige Anlage unter verschiedenen Bezeichnungen, darunter Fusion Nuclear Science Facility (FNSF), Component Test Facility (CTF) oder Volumetric Neutron Source (VNS) (Pearson et al. 2018, S. 1145; Federici 2023; Abdou et al. 2021; Stork 2009, S. 111).

4 Start-ups

Eine Vielzahl an privat finanzierten Start-ups hat begonnen, alternative Ansätze für die Kernfusion zu erproben und damit den Weg zu einem Fusionskraftwerk zu ebnet.

Start-ups versprechen häufig, in 8 bis 10 Jahren Fusionsstrom ins Netz einspeisen zu können.

Zentrale technische Herausforderungen werden dabei allerdings oft ausgeblendet.

Bis vor Kurzem war Kernfusion vor allem eine Angelegenheit großer, staatlich finanzierter Forschungsprogramme. Forschungsarbeiten fanden an Universitäten oder nationalen bzw. internationalen Großforschungseinrichtungen statt. Heute jedoch haben private Geldgeber und Risikokapitalfonds begonnen, in großem Maßstab in neue Start-ups zu investieren, die alternative Ansätze für die Kernfusion erproben und damit den Weg zu einem Fusionskraftwerk ebnet wollen. Auf diese Weise hat sich inzwischen eine Vielzahl an Start-ups etabliert. Eine Datenbank der weltweiten Fusionsaktivitäten, die einen Überblick über die Start-up-Szene bietet, wird von der International Atomic Energy Agency (IAEA/Internationale Atomenergiebehörde) gepflegt (IAEA o.J.). Dort sind derzeit 33 privat finanzierte Versuchs- und Demonstrationsanlagen gelistet, die geplant, in Bau oder bereits in Betrieb sind.

Start-ups profitieren von agileren Strukturen zur Entscheidungsfindung (beispielsweise sind sie nicht an das öffentliche Vergaberecht gebunden) und hoffen, damit schnellere Innovationszyklen voranzutreiben. Einige davon haben strategische Partnerschaften über Organisationsgrenzen hinweg geschlossen (z. B. mit Forschungszentren). In einem solchen Ökosystem bzw. Forschungscluster kommt öffentlichen Laboratorien sowie Universitäten und Forschungseinrichtungen die Rolle zu, wissenschaftliche FuE von Weltrang zur Unterstützung der Privatindustrie bereitzustellen (Pearson 2020, S. 10-31).

Wissenschaftlich betrachtet handelt es sich bei etlichen der als neuartig propagierten Konzepte um Forschungslinien, die aus der Anfangsphase der Fusionsforschung der 1950er und 1960er Jahre stammen und die zugunsten der – aus damaliger Sicht erfolgversprechenderen – D-T-Fusion auf dem Weg des ITER-DEMO-Pfades (bzw. der Laser-/Trägheitsfusion der NIF) fallen gelassen und nicht intensiv weiterverfolgt wurden. Ein Beispiel ist die Z-Pinch-Konfiguration, die 1964 erdacht wurde (Yonas 1998) und heute vom Unternehmen Zap Energy vorangetrieben wird (Wikipedia o.J.g).

Die Hoffnung besteht darin, dass das heute zur Verfügung stehende wissenschaftliche Know-how und moderne Technologien dafür genutzt werden können, um die bestehenden Hindernisse zur praktischen Umsetzung der Fusion zu überwinden. Zu nennen sind hier u.a. Hochleistungsrechner für Simulationen, KI-Anwendungen sowie Hochtemperatursupraleiter.

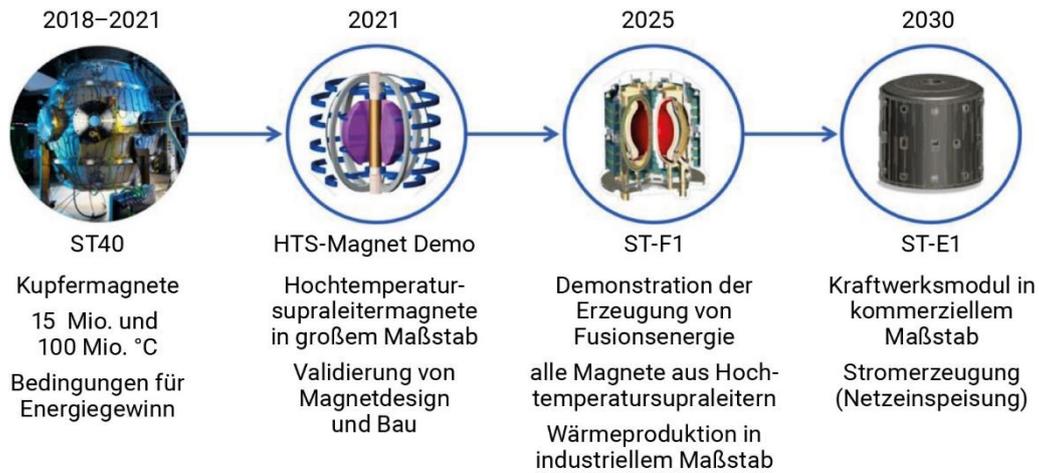
Die von Start-ups kommunizierten Zeitpläne (Roadmaps) versprechen häufig, dass innerhalb von 8 bis 10 Jahren Fusionsstrom ins Netz eingespeist werden könnte. Ein Beispiel ist in Abbildung 4.1 gezeigt. Die Roadmap der britischen Firma Tokamak Energy beinhaltet die Entwicklung eines Fusionsmoduls in kommerziellem Maßstab, das 2030 Strom einspeisen können soll. Wie allerdings in Kapitel 3 ausführlich beschrieben wurde, sind dafür noch immense Entwicklungsanstrengungen, u. a. im Bereich Materialentwicklung, beim Tritiummanagement sowie bei Balance-of-Plant-Systemen, erforderlich. Diese sind in der gezeigten Roadmap schlicht ausgeblendet.

Da etliche Start-ups ihre Forschungsergebnisse nicht publizieren, ist sehr schwer einzuschätzen, wie weit sie auf ihrem Weg bereits gekommen sind. Hierzu gehört auch, dass Erfolge gerne kommuniziert werden, aber Misserfolge nicht unbedingt. So hat beispielsweise Lockheed Martin Aeronautics Company (2014) als einer der Vorreiter auf dem Feld der privaten Fusionsforschung 2014 Aufsehen erregt, als es ankündigte, im Rahmen eines Compact Fusion genannten Vorhabens innerhalb von 5 Jahren einen Prototyp für einen Fusionsreaktor bauen zu wollen. Projektfortschritte wurden nicht öffentlich gemacht. Offenbar wurde das Projekt 2021 gestoppt, was erst 2 Jahre später bestätigt wurde (Aviation Week 2023).

Es ist nachvollziehbar, dass die Zeit- und Kostenpläne von Start-ups optimistisch sein müssen, um attraktiv für Kapitalgeber zu sein. Deswegen sollten allzu optimistisch anmutende Ankündigungen mit der gebotenen Skepsis aufgenommen und, wenn möglich, kritisch geprüft werden. Jassby (2018) hat in diesem Zusammenhang den Begriff Voodoo Fusion geprägt. Damit sind Plasmasysteme gemeint, mit denen „noch nie Fusionsneutronen erzeugt

wurden, deren Befürworter aber behaupten, dass sie innerhalb eines Jahrzehnts elektrische Energie ins Netz einspeisen oder als tragbare Stromerzeuger dienen werden“¹⁶ (Jassby 2018).

Abbildung 4.1 Roadmap von Tokamak Energy für die Entwicklung kommerzieller Fusionsmodule



Quelle: nach Windridge 2020, S. 5 ff.

Tabelle 4.1 Überblick über deutsche Start-ups

| | Proxima Fusion | Gauss Fusion | Focused Energy | Marvel Fusion |
|---|---|-------------------------|-----------------------|---------------|
| gegründet | 2023 | 2022 | 2021 | 2019 |
| Brennstoff | D-T | D-T | D-T | p-B(11) |
| Konzept | Stellarator mit Hoch- temperatursupraleitern | Tokamak, Stellarator | Laserfusion | Laserfusion |
| Organisation | Spin-out des Max- Planck-Instituts für Plasmaphysik | | Spin-out TU Darmstadt | |
| Finanzierung (selbst angegeben) in Euro | 40,5 Mio. | 18,2 Mio. | 110 Mio. | 200 Mio. |
| Zeitplan für Pilotanlage | 2030er Jahre | | 2037 | 2032 |

Quelle: FOA 2024, S. 38, 41, 64, 71

¹⁶ „(plasma systems) that have never produced any fusion neutrons, but whose promoters claim will put net electrical power on the grid or serve as a portable electric power generator within a decade or so.“ (Übersetzung TAB)

5 Wie wirtschaftlich kann Strom aus Kernfusion werden?

Konkrete Prognosen zu Kosten der Erzeugung von Fusionsstrom können derzeit nur spekulativ sein.

Fusionskraftwerke werden einen hohen Investitionsbedarf und lange Kapitalbindung aufweisen.

Die Komplexität von Fusionskraftwerken dürfte dazu führen, dass Kostensenkungen durch Lerneffekte eher klein ausfallen werden.

Investitionen in Fusionskraftwerke werden in liberalisierten Energiemärkten schwer zu realisieren sein, wenn das damit verbundene unternehmerische Risiko nicht durch die öffentliche Hand abgemildert wird.

Anforderungen des Netzbetriebs und der Strommärkte stellen für die ersten Fusionskraftwerke voraussichtlich sehr hohe Hürden dar.

Belastbare Aussagen über die Wirtschaftlichkeit bzw. Konkurrenzfähigkeit einer Technologie zur Stromerzeugung zu treffen, für die es mit Stand von heute noch keinen funktionierenden Prototyp gibt und deren breiter Markteintritt nicht vor Mitte des Jahrhunderts zu erwarten ist, ist naturgemäß schwierig. Zum einen hängt die Wirtschaftlichkeit von weiteren Fortschritten bei Forschung und Entwicklung ab. Unter anderem sind das tatsächliche Reaktordesign, die Materialauswahl und die Leistungsfähigkeit der plasmanahen Strukturen und der Komponenten des Tritiumzyklus derzeit noch unklar. Diese haben aber einen ganz wesentlichen Einfluss auf die ökonomische Attraktivität der Fusionstechnologie.

Zum anderen müssen für eine Abschätzung Annahmen über die langfristige Entwicklung von Rahmenbedingungen, wie Energieträgerpreise, Preise für Rohstoffe (Lithium, seltene Metalle) oder das Zinsniveau, getroffen werden, was nur mit großen Unsicherheiten möglich ist. Auch die technische und die Kostenentwicklung bei konkurrierenden Technologien zur Stromerzeugung (vor allem aus erneuerbaren Energien) entziehen sich der langfristigen Vorhersagbarkeit. Außerdem haben die Bauzeit eines Kraftwerks und Regulierungsfragen (Sicherheitsauflagen, Rückstellungen für Entsorgung o. ä.) einen grundlegenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit (TAB 2002, S. 47 f.).

In der Fachliteratur sind etliche Prognosen für zukünftige Stromerzeugungskosten von Fusionskraftwerken zu finden, beispielsweise Woodruff Scientific Inc. (2020); Ward et al. (2005); Najmabadi (1999); Cook et al. (2002). Diese basieren typischerweise auf einem auf der Basis bestehender Versuchsanlagen extrapolierten Kraftwerksdesign und einem exemplarisch herausgegriffenen Satz von Annahmen für die kritischen Parameter. Für den Vergleich verschiedener Designkonzepte von Fusionskraftwerken ist eine solche Herangehensweise durchaus gerechtfertigt und sinnvoll (Sheffield/Milora 2016). Für Prognosen zu absoluten Werten der Erzeugungskosten bzw. zur Wettbewerbsfähigkeit mit konkurrierenden Technologien eignet sie sich jedoch nicht.

Kasten 5.1 Kritik an Berechnungen von Stromerzeugungskosten

In der wissenschaftlichen Literatur finden sich etliche Publikationen, in denen Stromerzeugungskosten zukünftiger Fusionskraftwerke prognostiziert werden. Die Aussagekraft solcher Berechnungen ist in einigen Fällen deutlich geringer, als in den Veröffentlichungen suggeriert wird. Zum Beispiel wird in Woodruff Scientific Inc. (2020, S. 4, 9) ein Ergebnis von 4,27 US-Dollarcent/kWh für die Erzeugungskosten angegeben, gefolgt von der Behauptung: „Beachten Sie, dass diese Kosten günstig und kompakte modulare Fusionssysteme damit auf dem Markt der Zukunft wettbewerbsfähig sind.“^{17,18}

¹⁷ „Note that these costs are favorable and price compact modular fusion systems competitively in the marketplace of the future.“ (Übersetzung TAB)

¹⁸ Unter der Annahme einer Bauzeit von 3 Jahren und einer Verfügbarkeit von 90 %.

Eine ähnliche Aussage treffen, wenngleich etwas vorsichtiger Ward et al. (2005, S. 1226): „Unter Zugrundelegung eines konservativen Kraftwerkskonzepts, bei dem keine Fortschritte gegenüber den grundlegenden ITER-Parametern angenommen werden, werden die Stromerzeugungskosten bei gleichem technologischem Reifegrad als niedriger als bei der Photovoltaik und vergleichbar mit denen der Windenergie geschätzt (wenn Speicher für eine sichere Stromversorgung erforderlich sind). [...] die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine ausgereifte Fusionstechnologie Strom im Bereich von 3 bis 7 Eurocent/kWh liefern könnte, was auf dem künftigen Energiemarkt wettbewerbsfähig sein dürfte.“¹⁹

Ein vertiefter Blick auf die zugrunde gelegten Annahmen legt die Vermutung nahe, dass hier von Best-Case-Bedingungen ausgegangen wird. So wurde etwa in Woodruff Scientific Inc. (2020) eine Verfügbarkeit der Fusionskraftwerke von 90% angenommen. Solch hohe Werte werden im realen Strommarkt weltweit nur von wenigen Anlagen erreicht. Für die Bauzeit wurden 3 Jahre angesetzt, was für kerntechnische Anlagen eher unrealistisch anmutet. Ward et al. (2005) nehmen eine Kostenreduktion von 50% für das marktgängige Kraftwerk gegenüber dem Prototyp an, was für eine komplexe Technologie wie die Kernfusion sehr optimistisch erscheint (Kasten 5.2). Auf der anderen Seite wird bei den konkurrierenden erneuerbaren Technologien die unvorteilhafte Annahme getroffen, dass ein pauschaler Aufschlag für Speichersysteme erforderlich sei, um gesicherte Leistung zu generieren (Lechón 2005). Dies ist aber keineswegs die beste und auch nicht die übliche Art, intermittierende Stromerzeugung in ein Netz zu integrieren (TAB 2012).

Entler et al. 2018 (S. 489) erhalten aus ihren Berechnungen mit 16 US-Dollarcenten zwar einen relativ hohen Wert für die Erzeugungskosten von Fusionsstrom, was sie jedoch nicht daran hindert, zu schlussfolgern: „Der Vergleich zeigt, dass die Stromerzeugungskosten von Fusionskraftwerken mit denen der aktuellen erneuerbaren Energien wettbewerbsfähig sind.“²⁰

In der Literatur findet man sogar die Annahme einer 95%-igen Verfügbarkeit, die – nicht überraschend – zu sehr niedrigen errechneten Erzeugungskosten (in diesem Fall 6 US-Dollarcenten pro kWh bereits für den Prototyp) führt (Chuyanov/Gryaznevich 2017).

Aus den aus heutiger Sicht zu erwartenden Eigenschaften zukünftiger Fusionskraftwerke und unter der Annahme, dass die Strommärkte und der Netzbetrieb in groben Zügen so organisiert sind wie heute, lassen sich einige ökonomische Charakteristika ableiten. Fusionskraftwerke werden voraussichtlich Anlagen in der Leistungsklasse von 1.000 MW (thermisch) sein.²¹ Da der Brennstoff innerhalb der Anlagen selbst erzeugt werden soll (Kap. 3.2.2), spielen die Kosten für Brennstoff für die Wirtschaftlichkeit des Kraftwerks keine wesentliche Rolle. Auch andere variable Betriebskosten sind von untergeordneter Bedeutung. Die Stromerzeugungskosten werden demzufolge von den fixen Kosten, insbesondere den Kapitalkosten und damit von Parametern wie Baukosten und Zinsniveau, bestimmt sein.

Wie bei anderen Kraftwerkstypen, deren Erzeugungskosten von Fixkosten dominiert sind (beispielsweise Kernkraftwerke), besteht ein starker ökonomischer Anreiz, zu jeder Zeit so viel Strom wie möglich zu produzieren. Somit kommt der Verfügbarkeit des Kraftwerks eine hohe Bedeutung zu. Verfügbarkeit wird der Anteil eines Betrachtungszeitraums genannt, in dem das Kraftwerk mit voller Leistung Strom ins Netz einspeist (angegeben in Prozent oder auch in Volllaststunden pro Jahr). Ein Lastfolgebetrieb, also das Hoch- bzw. Herunterfahren eines Fusionskraftwerks als Reaktion auf Nachfrageschwankungen, ist somit ökonomisch äußerst unattraktiv, unabhängig davon, ob er technisch möglich ist oder nicht (TAB 2017).

In liberalisierten Strommärkten stellen gerade bei kapitalintensiven Großkraftwerken volatile Preise für Betreiber von Kraftwerken ein ökonomisches Risiko dar. Zusätzlich führt für Entwickler neuer Kraftwerke das höhere Fertigstellungsrisiko zu erheblichen Unsicherheiten. Diese haben Risikoaufschläge bei Kreditgebern und somit erhöhte Kapitalkosten zur Folge.

¹⁹ „Taking a conservative power plant conceptual design, in which no advances over the basic ITER parameters are assumed, the cost of electricity is estimated to be lower than PV and comparable to wind (if storage is needed for firm power) at the same level of technological maturity. [...] the results suggest a mature fusion technology could supply electricity in the range 3 till 7 Eurocents/kWh, likely to be competitive in the future energy market.“ (Übersetzung TAB)

²⁰ „The comparison shows the levelized cost of electricity of fusion power plants competitive to the actual renewable resources.“ (Übersetzung TAB)

²¹ In Kapitel 5.5 wird dargelegt, was sich bei den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen ändert, sollten sich etwa Fusionskonzepte durchsetzen, die kleine Reaktoren ermöglichen, wie sie derzeit von vielen Start-ups favorisiert werden.

Damit Großkraftwerke für die Teilnahme am Strommarkt zugelassen werden können, müssen sie hohen Anforderungen an ihre Zuverlässigkeit genügen. Der Grund ist, dass ungeplante Ausfälle zu Netzinstabilitäten und im ungünstigen Fall zu Blackouts führen können. Daher werden Kraftwerke, die ihre vertraglich zugesagte Strommenge aufgrund eines ungeplanten Ausfalls nicht liefern können, mit empfindlichen Strafzahlungen sanktioniert (Peek/Diels 2016). Eine Modellierung für einen ökonomisch tragfähigen Betrieb von Fusionskraftwerken von Takeda et al. (2020) hatte zum Ergebnis, dass ungeplante Ausfälle maximal alle 3 Jahre vorkommen dürften. Hierbei waren Ausfälle, die etwa durch Plasmadisruptionen verursacht werden, eingeschlossen (Kap. 2.1).

Eine ungünstige Eigenschaft von Fusionskraftwerken ist, dass sie zum Anfahren und Aufheizen des Plasmas viel Energie benötigen. Eine Leistung von mehreren 100 MW, die hierfür aus dem Netz bezogen werden muss, ist für den Netzbetrieb, der sich nach einem vorangegangenen Ausfall ggf. noch in einem instabilen Zustand befindet, eine schwer zu bewältigende Belastung (Nuttall 2020, S. 11-14).

Geplante Abschaltungen, insbesondere für den regelmäßigen Austausch von Brutblankets bzw. für kleinere Revisionen, müssen aus ökonomischen Gründen, aber auch, um das Ziel der Tritiumselbstversorgung nicht zu gefährden, möglichst selten stattfinden und möglichst kurz andauern. Bei Kern(spaltungs)kraftwerken ist beispielsweise ein Zyklus von 18 Monaten Dauerbetrieb, gefolgt von 2 bis 3 Wochen Abschaltung zum Brennelementewechsel, üblich.

Ein Nachweis, dass die beschriebenen anspruchsvollen Ziele für Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit erreichbar sind, kann nur durch praktische Betriebserfahrungen erbracht werden. Dies kann unter Umständen einen längeren Zeitraum bis zu einigen Jahren erfordern (Webbe-Wood/Nuttall 2023). Ohne Mechanismen, um diese Bau- und Betriebsrisiken abzufedern, d. h. vor allem direkte oder indirekte staatliche Unterstützung, sind solche Projekte kaum vorstellbar (Webbe-Wood 2020, S. 4-3; World Nuclear Association 2022).

Ein im Prinzip sehr naheliegender Ansatz ist es, Energieversorgungsunternehmen (EVU) als potenzielle künftige Betreiber von Fusionskraftwerken einzubinden, um abzuklären, welchen Kriterien diese Anlagen genügen müssten, um für EVUs attraktiv zu sein. 1994 hat das US-amerikanische Electric Power Research Institute (EPRI) ein Panel von Managern und Experten aus der Energieindustrie zusammengestellt, die solche Kriterien formuliert haben (Kaslow et al. 1994). Die Liste der ökonomischen Kriterien umfasst:

- Größenflexibilität, d. h. die Möglichkeit, Anlagen mit unterschiedlichen Kapazitäten zu bauen, ohne dass die Größe einen Kostennachteil mit sich bringt;
- geringer Flächenbedarf;
- schnelle und einfache Konstruktion;
- einfaches Design;
- hohe Zuverlässigkeit;
- hohe Verfügbarkeit der Anlagen;
- lange Lebensdauer;
- niedrige Kosten beim Brennstoffzyklus;
- minimaler Bedarf an Betriebspersonal;
- Personalqualifikation ähnlich wie bei konkurrierenden Technologien;
- niedrige Kosten für Rückbau und Entsorgung.

Aus heutiger Sicht ist bei kaum einem dieser Kriterien klar, ob bzw. in welchem Umfang es von zukünftigen Fusionskraftwerken erfüllt werden kann. Bei Entscheidungen über Kraftwerksdesign und Betriebsparameter können sie als Leitschnur dienen. Hierfür wären allerdings eine Aktualisierung der Kriterien und ihre Ausrichtung auf die Bedingungen am europäischen Strommarkt anzuraten.

Kasten 5.2 Thema Lernrate

Ein Parameter, der für die Einschätzung der ökonomischen Attraktivität einer breiten Einführung von Fusionskraftwerken eine bedeutsame Rolle spielt, ist die Lernrate. Sie gibt an, um wie viel Prozent ein folgendes Kraftwerk billiger werden kann, weil durch den Bau des vorigen Spar- und Effizienzpotenziale entdeckt und erschlossen werden konnten.

Bei Kernfusion wird häufig angenommen, dass die Lernrate im Bereich von 15 bis 20 % liegt. Denn dies sei ein typischer Wert, mit dem in der Industrie zu rechnen sei (Gryaznevich et al. 2015, S. 7). Das bedeutet, dass bereits nach fünf Reaktorgenerationen die Kosten auf die Hälfte fallen würden.

Dem widersprechen Forschungsergebnisse von Schmidt (2023) und Malhotra/Schmidt (2020), wonach die Lernrate sehr stark von der Komplexität einer Technologie abhängt. Je größer die Komplexität bei Design, Anpassung an Kundenwünsche und Produktion ist, desto niedriger ist die Lernrate. Technologien mit sehr hoher Komplexität, wie sie bei Kernfusion unzweifelhaft vorliegt, weisen typische Lernraten von lediglich um die 4 % auf. Das heißt, die zweite Kraftwerksgeneration verursacht immer noch 96 % der Kosten gegenüber der ersten. In einigen Publikationen wird darauf hingewiesen, dass es keineswegs gesichert ist, dass Lerneffekte positive Auswirkungen auf die Kosten haben. So sind beim Neubau von Kern(spaltungs)kraftwerken in der Vergangenheit vermehrt sogar negative Lernraten aufgetreten, das heißt die vorangegangene Kraftwerksgeneration war kostengünstiger als die darauf folgende (Makhijani/Ramana 2021; Malhotra/Schmidt 2020, S. 2262; Thomas/Ramana 2022, S. 11).

5.1 Integration in ein von erneuerbaren Energien geprägtes Stromsystem

Um die fluktuierende Einspeisung von Solar- und Windstrom auszugleichen, sind schnell regelbare Kraftwerke mit niedrigen Investitionskosten erforderlich.

Fusionskraftwerke können diese Aufgabe absehbar nicht erfüllen.

Falls Fusionskraftwerke ab Mitte des Jahrhunderts breit verfügbar sein sollten, würden sie auf ein Stromsystem treffen, das maßgeblich von erneuerbaren Energien geprägt ist. Zum Ausgleich der zeitlichen Variabilität der Einspeisung von Wind- und Solaranlagen sind zum einen schnell regelbare Erzeugungskapazitäten erforderlich, damit die Erzeugung jederzeit der Nachfrage angepasst werden kann. Zum anderen braucht es Reservekapazitäten zur Überbrückung von gelegentlich auftretenden Perioden mit geringem Dargebot an Sonne und Wind (Dunkelflauten von einigen Tagen).

Für diese Einsatzzwecke kommen aus ökonomischen Gründen nur Kraftwerke infrage, die geringe Investitionskosten aufweisen. Höhere variable Kosten können in Kauf genommen werden, da diese Kraftwerke ohnehin nur wenige Stunden im Jahr ausgelastet werden (z. B. einige hundert Vollaststunden). Derzeit sind dies typischerweise Gasturbinen, die in Zukunft für einen CO₂-armen Betrieb mit CCS-Technik (Carbon Capture and Storage/CO₂-Abscheidung und Speicherung) ausgestattet oder mit Wasserstoff betrieben werden könnten. Ein Bedarf an Kraftwerken, die über das gesamte Jahr konstant Strom einspeisen (Grundlastkraftwerke), besteht in einem solchen Stromsystem nicht (Nicholas et al. 2021, S. 3; TAB 2012).

Damit Fusionskraftwerke den Anforderungen eines von erneuerbaren Energien geprägten Stromsystems gerecht werden können, müssten sie technisch gesehen in der Lage sein, ihre Leistung in einem weiten Bereich schnell hoch- und runterzufahren (Lastfolgebetrieb). Derzeit ist es unklar, ob die Energieerzeugung im Plasma gezielt gesteuert werden könnte, ohne die Stabilität des Plasmabetriebs zu gefährden. Daher werden Konzepte in Betracht gezogen, bei denen die Stromerzeugung von der Wärmeerzeugung zeitlich entkoppelt wird, indem vor den Generator ein Wärmespeicher geschaltet wird (Nicholas et al. 2021, S. 4).

Unabhängig von der technischen Machbarkeit eines Lastfolgebetriebs von Fusionskraftwerken stellt sich die Frage, ob dieser ökonomisch umsetzbar wäre. Fusionskraftwerke der 1 GW-Klasse, wie sie aus dem ITER-DEMO-PROTO Entwicklungspfad zu erwarten wären, werden absehbar hohe Investitionen erfordern und dementsprechend einem starken ökonomischen Druck ausgesetzt sein, zu jeder Zeit möglichst viel Strom zu erzeugen, um Deckungsbeiträge zu erwirtschaften. Damit wären sie für einen Lastfolgebetrieb und ebenso als vorgehaltene Reservekraftwerke, die nur situativ eingesetzt werden, denkbar ungeeignet (Tynan/Abdulla 2020, S. 8 f.).

Das ist analog zu Kern(spaltungs)kraftwerken, die weltweit nur in Ausnahmefällen zum Lastfolgebetrieb herangezogen wurden bzw. werden, obwohl dies technisch möglich ist (zumindest in einem begrenzten Leistungsbereich oberhalb etwa 50% der Nennleistung). Einen Sonderfall stellt in dieser Beziehung Frankreich dar, wo der Anteil von Kernkraft am Strommix so groß ist, dass schlichtweg keine andere Möglichkeit besteht. In Deutschland hingegen wurden lediglich einzelne Kern(spaltungs)kraftwerke, deren Investitionen sich bereits amortisiert hatten, situativ im Lastfolgebetrieb eingesetzt (TAB 2017, S. 30).

5.2 Fusionskraftwerke in Entwicklungsländern

Für Entwicklungsländer sind Fusionskraftwerke schwer zu realisieren.

Voraussetzungen sind u. a. gut ausgebaute Stromnetze, hohe Investitionen sowie spezialisiertes kerntechnisches Know-how, die hohe Hürden für Entwicklungsländer darstellen.

Der gelegentlich geäußerten Hoffnung, dass Fusionskraftwerke dazu beitragen können, die Energiearmut in Entwicklungsländern zu bekämpfen (Westra/Kuyvenhoven 2007), stehen (leider) einige gewichtige Argumente entgegen. Als erstes ist die *Zeitskala* zu nennen. Kernfusion könnte aus heutiger Perspektive einen spürbaren Anteil an der weltweiten Energieversorgung frühestens ab der zweiten Hälfte des Jahrhunderts liefern. Energiearmut ist dagegen ein aktuell drängendes Problem, für das kurzfristige Lösungen gefunden werden müssen.

Der nächste Grund bezieht sich auf den *Netzbetrieb*. Fusionskraftwerke werden voraussichtlich in einem Leistungsbereich in der Größenordnung 1.000 MW arbeiten (zu Konzepten für deutlich kleinere Reaktoren siehe Kapitel 5.5). Damit ein ungeplanter Ausfall eines solchen Kraftwerks ohne größere Störung aufgefangen werden kann, muss das Stromnetz eine gewisse Mindestgröße aufweisen und hinreichend gut ausgebaut sein. Dies ist in vielen Ländern etwa des globalen Südens nicht der Fall. In kleineren Netzen (oder in solchen, die stark von erneuerbarer Energie geprägt sind) würden sich bei ungeplanten Ausfällen ggf. so hohe Frequenzsprünge ergeben, dass die Systemstabilität gefährdet ist. Takeda et al. (2015) kommen zum Ergebnis, dass es in der Mehrheit der Länder weltweit schwierig wäre, Fusionskraftwerke in den Netzbetrieb zu integrieren.

Des Weiteren sind der hohe *Investitionsbedarf* und das erforderliche spezialisierte Know-how (vor allem kerntechnische Expertise für den Umgang mit Tritium) zu nennen, die hohe Einstiegshürden für viele Entwicklungs- und Schwellenländer darstellen. Darüber hinaus sind sowohl der Umgang mit Tritium als auch die Erzeugung intensiver Neutronenflüsse, die sich zum Erbrüten von waffenfähigen Materialien nutzen lassen würden, geeignet, Bedenken in Bezug auf *Proliferationsrisiken* auszulösen, also der Sorge vor einer Weiterverbreitung von Kernwaffen(technologie). Eine Verbreitung der Kernfusionstechnologien in Länder, die offen oder verdeckt Kernwaffenfähigkeiten anstreben, wäre somit zu verhindern oder nur unter strengen Sicherheitsmaßnahmen (Safeguards; Kap. 9) möglich.

5.3 Alternative Märkte

Als Pilotmärkte für Fusionsenergie könnten sich Anwendungen wie Meerwasserentsalzung, industrielle Prozesswärme oder Wasserstoffherstellung ggf. besser als der Stromsektor eignen.

Die vorherrschende Konzentration auf die Stromerzeugung als primäre Einsatzdomäne für Fusionsenergie kann aus mehreren Gründen infrage gestellt werden. Zum einen hat Strom nur einen Anteil von grob 20% am globalen Primärenergieverbrauch. Das Einbeziehen von Sektoren wie Kraftstoffproduktion oder Wärmeanwendungen könnte somit das zukünftige Marktpotenzial von Fusionsenergie erheblich erweitern. Zum anderen stellt sich die Frage nach dem Beitrag, den Kernfusion zu den klimapolitischen Zielen leisten könnte. Ein breiter Markteintritt von Fusionskraftwerken vor Mitte des Jahrhunderts erscheint nicht als realistisch. Weil die internationale Klimapolitik in Übereinstimmung mit den Zielen der Bundesregierung die Dekarbonisierung des Stromsystems vor diesem Datum erfordert, werden Fusionskraftwerke hier keinen weiteren Beitrag leisten können. Auch dies spricht dafür, den Blick auf andere Sektoren der Energienutzung zu weiten (Griffiths et al. 2022).

Da außerdem die Anforderungen des Strommarktes und des Netzbetriebs hohe technische und ökonomische Eintrittshürden für Fusionskraftwerke darstellen, wie am Anfang des Kapitels 5 beschrieben, werden in letzter Zeit in der Literatur verstärkt alternative Märkte thematisiert, die sich als Pilotmärkte für die ersten Fusionskraftwerke möglicherweise besser eignen würden als der Stromsektor.

Meerwasserentsalzung

Meerwasserentsalzung wird als Anwendung für Fusionsenergie diskutiert, weil in vielen Ländern ein großer Bedarf an Frischwasser besteht, der durch entsalztes Meerwasser gedeckt werden könnte. Bisher werden hierfür verbreitet fossile Energien eingesetzt. Der derzeit größte Anlagenkomplex Dschabal Ali (Vereinigte Arabische Emirate) besteht aus mehreren erdgas- und ölgefeuerten Kraftwerken, die mit Entsalzungsanlagen kombiniert sind. Bei einer elektrischen Gesamtleistung von ca. 8,6 GW werden dort pro Tag 2,135 Mio. m³ Wasser entsalzt (Wikipedia 2023a). Die Nachfrage nach solch großen Anlagen dürfte eher vereinzelt und nur unter speziellen Bedingungen vor Ort gegeben sein. Ein Flaschenhals wäre die Infrastruktur, um die großen Wassermengen zu transportieren, zu verteilen und zu nutzen. Daher wären kleinere Fusionskraftwerke für diesen Zweck wohl eher geeignet (Griffiths et al. 2022, S. 7 f.). Als Nebenprodukt könnte aus dem anfallenden Salz beispielsweise Lithium gewonnen werden, womit einer der Rohstoffbedarfe der Fusionstechnologie (mit)gedeckt werden könnte.

Prozesswärme

Prozesswärme wird für viele industrielle Anwendungen benötigt. Da Wärmetransport über größere Entfernungen aufwendig und verlustreich ist, müsste das Fusionskraftwerk in der Nähe von Anlagen stehen, die die Wärme nutzen. Das schränkt die Standortwahl ein und begrenzt die Größe des Marktsegments. Für Hochtemperaturanwendungen kommt Fusion zunächst wohl nicht infrage, weil die hierfür notwendigen Materialien erst noch entwickelt werden müssten.

Insgesamt betrachtet scheint Prozesswärme bei bestehenden Industrien ein schwieriger Anfangsmarkt für die Kernfusion zu sein (Handley et al. 2021, S. 18). Als möglicherweise attraktive Option für die thermische Nutzung von Fusionsenergie wird in Konishi et al. (2020, S. 12-1 ff.) der Aufbau einer Kraftstoffproduktion aus Biomasse mittels Pyrolyse ins Spiel gebracht.

Herstellung von Wasserstoff

Verglichen mit der netzgekoppelten Stromerzeugung hat die Herstellung von Wasserstoff einige Vorteile, da die Anforderungen an Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Kraftwerke nicht ganz so streng sein müssten. Ein denkbare Konzept ist die Vision einer Fusionsinsel (Fusion Island), bei der auf einer Offshoreplattform ein Fusionskraftwerk, eine Meerwasserentsalzungsanlage, ein Elektrolyseur zur Wasserstoffherstellung sowie ein Anleger für Wasserstofftankschiffe integriert sind (Nuttall 2020, S. 11-16 f.). Ob eine solche Fusionsinsel ökonomisch zu betreiben wäre, ist derzeit noch ungeklärt, allerdings wird Wasserstoff absehbar zu einem in großen Mengen weltweit gehandelten Energieträger werden. Die Märkte hierfür dürften sich durch einen harten Preiswettbewerb auszeichnen, dem sich Fusionskraftwerke zu stellen hätten.

Neutronen als ökonomisches Produkt

Eine weitere Möglichkeit für eine Nische, in der eine frühe Kommerzialisierung der Fusion attraktiv sein könnte, ist die unmittelbare kommerzielle Nutzung der 14-MeV-Neutronen, wie sie bei der D-T-Fusion erzeugt werden (Nuttall 2020, S. 11-7). Denkbar sind etwa medizinische Anwendungen, und zwar strahlenmedizinische (wie die Bor-Neutronen-Einfangtherapie (Finke et al. 1999) oder aber die Produktion von diagnostischen und therapeutischen medizinischen Isotopen, z. B. Technetium-99m (Wikipedia o.J.f).

Darüber hinaus gibt es Überlegungen, ob nicht die Neutronen aus der Kernfusion für den zivilen Brennstoffkreislauf der Kernspaltung genutzt werden könnten. Hierbei könnten etwa Kernbrennstoffe erbrütet werden, was die Abhängigkeit von der Verfügbarkeit von Natururan mindern würde. Solche Fusion-Fission-Hybridkonzepte würden allerdings die der Fusionstechnologie zugeschriebenen Vorteile konterkarieren, dass keine langlebigen hochradioaktiven Abfälle und keine Spaltstoffe, die für Kernwaffen missbraucht werden können, entstehen.

Alternativ wird auch die Möglichkeit diskutiert, die hochradioaktiven Abfälle mittels Bestrahlung mit Fusionsneutronen in weniger problematische Stoffe umzuwandeln (Transmutation) (Gerstner 2009).

5.4 Aufbau einer Fusionsindustrie

Der Aufbau einer leistungsfähigen Technologie- und Wertschöpfungskette der Fusionsindustrie erfordert einen langen Atem.

Da Fusionskraftwerke voraussichtlich ähnlich wie Kern(spaltungs)kraftwerke kapitalintensive kerntechnische Großanlagen sein werden, liegt es nahe, Vergleiche zwischen beiden Technologielinien zu ziehen. Das wird in der wissenschaftlichen Literatur auch verbreitet gemacht. Ein stark vereinfachtes Vergleichsargument wird etwa von Pearson (2020, S. 10-25) vorgebracht: Fusionskraftwerke seien deutlich komplexer aufgebaut als etwa herkömmliche Druckwasserreaktoren. Diese Komplexität spräche dafür, dass sie deutlich teurer sein werden, woraus Pearson folgert: „Auf Grundlage dieses etwas vereinfachten, aber nützlichen indikativen Kostenvergleichs ist es schwer zu verstehen, wie ein Reaktor im ITER-Maßstab jemals wirtschaftlich sein könnte.“²²

Für eine zukünftige Fusionsindustrie, die den Bau von Fusionskraftwerken organisiert, können ggf. die Erfahrungen von Interesse sein, die derzeit im Nuklearsektor hinsichtlich des Neubaus von Kern(spaltungs)kraftwerken gemacht werden.

Der Nuklearsektor befindet sich gegenwärtig an einem kritischen Punkt, weil die jüngsten großen Kernkraftwerkprojekte in Europa und den Vereinigten Staaten darunter leiden, dass Kosten, Zeitpläne und vordefinierte Projektvorgaben nicht eingehalten werden (Thomas/Ramana 2022). Dies wird von einigen Wissenschaftlern als chronisches Versagen großer, komplexer Infrastrukturprojekte bezeichnet (Lehtonen 2021).

Durch die langen Zeiträume zwischen den Bauprojekten hat der Neubau von Kern(spaltungs)kraftwerken (zumindest in den westlichen Ländern) gegenwärtig fast wieder den Charakter von Prototypen, obwohl sich die Technologie der Neubauvorhaben nicht sehr stark von der etablierten Technologie bestehender Druckwasserreaktoren unterscheidet. Es fehlt seit längerem an einem eingespielten und verlässlichen Geflecht von Zulieferern. Das technologische und organisatorische Know-how, um Bauprojekte (im Zeit- und Kostenrahmen) zu realisieren, ist erodiert. Regulierungsbehörden mangelt es an praktischen Erfahrungen, was dazu führt, dass sie extrem vorsichtig agieren und nicht bereit sind, pragmatisch von festgeschriebenen Prozeduren abzuweichen (Lehtonen 2021, S. 1337).

Diese Gemengelage hat drastische Auswirkungen auf die Baukosten: Wurden etwa in Frankreich im historischen Mittel zwischen 1971 und 1991 Kernkraftwerke zu Kosten von 2.000 bis 3.000 US-Dollar/kW_{el} gebaut (auf Preise von 2017 bezogen), so beliefen sich die Baukosten der drei letzten Projekte (Oikiluoto, Flamanville, Hinkley C) mit 7.300 bis 8.300 US-Dollar/kW_{el} auf das Drei- bis Vierfache. Zu diesen Konditionen sind Kernkraftwerke ökonomisch nicht konkurrenzfähig (MIT 2018, S. 34 ff.).

Für einen ökonomisch tragfähigen Neubau zukünftiger Fusionskraftwerke wäre der Aufbau einer leistungsfähigen Technologie- und Wertschöpfungskette der Fusionsindustrie erforderlich, die einen breit angelegten Auf- und Ausbau eines Fusionskraftwerksparks vorantreibt. Bis eine solche Branche aufgebaut und eingespielt ist, können Jahrzehnte vergehen (Tynan/Abdulla 2020, S. 11).

5.5 Kleine Reaktoren vs. große Reaktoren

Kleine Reaktoren versprechen Vorteile, wie einen deutlich geringeren Investitionsbedarf sowie eine mögliche Kostenreduktion durch Serienfertigung.

Voraussetzungen für die Realisierung dieser Vorteile ist der verlässliche Absatz von größeren Stückzahlen.

Ob kleine Fusionskraftwerke technisch machbar sein werden, ist ungeklärt.

Der gegenwärtig am weitesten entwickelte Pfad zur Kommerzialisierung von Fusionskraftwerken über die Schritte ITER → DEMO → PROTO zielt auf Großanlagen mit thermischen Leistungen im Bereich 1.000 MW und mehr. Alternativ dazu wird derzeit in Fachkreisen intensiv über Konzepte von kleinen, modular aufgebauten Kraftwerken nachgedacht. Erwartete Vorteile davon wären ein deutlich geringerer Investitionsbedarf, mögliche Kostenreduktionen durch Serienfertigung, eine bessere Skalierbarkeit sowie eine größere Flexibilität bei der Standortwahl (Webbe-Wood 2020, S. 4-2). Diese Diskussion ist nicht neu, denn sie wird ganz ähnlich seit vielen Jahren bei Kern(spaltungs)kraftwerken unter dem Stichwort Small Modular Reactors (SMR) geführt.

Im Falle der Kernfusion ist die wissenschaftlich-technische Machbarkeit kleiner Kraftwerke (etwa im Bereich um 150 MW thermisch) fraglich. Nach gegenwärtigem Verständnis wären dazu bedeutende Durchbrüche erforderlich, beispielsweise im Bereich der Hochtemperatursupraleitung. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass die Aufrechterhaltung eines stabilen Plasmas deutlich einfacher wird, je größer die Anlagendimensionen sind. Vereinfacht gesagt liegt dies daran, dass Verlustprozesse an der Oberfläche des Plasmas stattfinden und diese bei großen

²² „based on this somewhat oversimplified but useful indicative cost comparison, it is hard to understand how an ITER-scale reactor would ever be economical.“ (Übersetzung TAB)

Anlagen im Verhältnis zum Volumen kleiner ist.²³ Und auch wenn ein stabiler Plasmabetrieb erreicht werden kann, stellt ein kompaktes Reaktordesign eine große Herausforderung dar. Eine einfache Reduktion der Abmessungen bei gleicher Plasmaleistung führt zu extrem hoher Wärme- und Strahlungsbelastung bei den Komponenten des Plasmagefäßes. Das führt wiederum zu erhöhtem Verschleiß und Austauschbedarf, was mit vermehrten Stillstandszeiten, Instandhaltungskosten und einer größeren Menge an erzeugten radioaktiven Abfällen einhergeht (Goto 2020, S. 9-10).

Im Hinblick auf die ökonomische Attraktivität haben kleine gegenüber großen Kraftwerken einen wesentlichen Nachteil. Bei den Baukosten für ein Kraftwerk gibt es Anteile, die gar nicht oder nur schwach von der Größe des Kraftwerks abhängen, etwa das Heizsystem für das Plasma oder die Einrichtungen für die Stromerzeugung. In einer Überschlagsrechnung kommen beispielsweise Goto (2020, S. 9-11) zu dem Schluss, dass bei gleicher Qualität des Plasmaeinschlusses ein halb so großes Kraftwerk zwar 44% weniger kosten, aber lediglich ein Viertel der Leistung liefern würde, was insgesamt zu einer Erhöhung der Stromgestehungskosten um einen Faktor 2,24 führen würde.

Um diesen Größennachteil aufzufangen, müssten kleine Kraftwerke in großer Anzahl in Serienfertigung (am Fließband) produziert werden. So haben beispielsweise Wimmers et al. (2023, S. 117) für Kernspaltungs-SMR modellgestützt errechnet, dass erst ab etwa 3.000 produzierten SMR Kostenvorteile gegenüber Großkraftwerken entstehen. Damit die Kostensenkungspotenziale für diese Art von Fertigung realisiert werden können, müssen Produktionskapazitäten und ein Netz aus Zulieferern aufgebaut werden. Die Vorabinvestitionen, um eine ganze Branche mit den entsprechenden Wertschöpfungsketten aufzubauen, sind enorm. Ökonomisch getrieben, d.h. ohne externe Unterstützung, kann dies nur vonstattengehen, wenn der Absatz einer großen Zahl von Anlagen glaubwürdig erwartet werden kann (Makhijani/Ramana 2021). Thomas/Ramana (2022, S. 12) machen darauf aufmerksam, dass es auch in Branchen mit höchstem Qualitätsanspruch, etwa der Luftfahrtindustrie, immer wieder zu Rückrufen kommt, wenn versteckte Konstruktions- oder Produktionsfehler entdeckt werden. Fehler dieses Typs bei einer großen Flotte an Kraftwerken mit radioaktivem Innenleben zu beheben, wäre absehbar problematisch und kostenintensiv.

²³ Beispielsweise ist die Oberfläche einer Kugel proportional zum Radius im Quadrat, das Volumen hingegen ist proportional zum Radius zur dritten Potenz. Wenn der Radius vergrößert wird, steigt somit das Volumen deutlich schneller an als die Oberfläche. Dieser Zusammenhang gilt in ähnlicher Weise für einen Torus (Form eines Tokamaks) und andere Körper.

6 Beitrag zum Klimaschutz

Werden aktuelle Klimaschutzziele erreicht, kämen Fusionskraftwerke voraussichtlich zu spät, um einen Beitrag zur Dekarbonisierung der Energiewirtschaft zu leisten.

Bei einem starken langfristigen Anstieg des globalen Energieverbrauchs erhöhen sich die Marktchancen für Fusionsenergie.

Unbestritten hat Fusionsenergie, wenn sie praktisch umgesetzt werden kann, das Potenzial, zu einer CO₂-armen Energieversorgung beizutragen. Abschätzungen der CO₂-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus von Fusionskraftwerken ergaben Werte im Bereich von etwa 10 g CO_{2eq}/kWh Strom (Takeda/Gonzalez de Vicente 2020, S. 3-3). Zum Vergleich weist die photovoltaische Stromerzeugung Lebenszyklusemissionen im Bereich von etwa 10 bis 60 g CO_{2eq}/kWh auf, die überwiegend aus der Produktion der Solarmodule stammen (Hengstler et al. 2021, S. 33). Allerdings müsste für einen merkbaren Beitrag zum Klimaschutz eine energiewirtschaftlich relevante Menge an Fusionsenergie bereitgestellt werden, was eine signifikante Marktdurchdringung voraussetzt.

Deutschlands Klimaschutzziele sehen vor, dass bis 2045 eine Nettotreibhausgasneutralität erreicht wird. Als Zwischenschritte werden Treibhausgasminderungen (gegenüber 1990) um mindestens 65 % bis 2030 sowie mindestens 88 % bis 2040 angestrebt (Bundes-Klimaschutzgesetz – KSG). Bei den sektorspezifischen Zielen wird der Energiewirtschaft das größte Umstellungstempo auf CO₂-arme Technologien (vor allem erneuerbare Energien) zugetraut. Die Dekarbonisierung der Sektoren Industrie, Gebäude und Verkehr ist deutlich schwieriger und somit langsamer.

Wenn Fusionskraftwerke nach gegenwärtiger Einschätzung frühestens ab Mitte des Jahrhunderts breit zur Verfügung stehen könnten, kämen sie voraussichtlich zu spät, um für die Dekarbonisierung der Energiewirtschaft einen Beitrag zu leisten. Voraussetzung ist, dass die angestrebten Klimaschutzziele auch tatsächlich erreicht werden. Möglichkeiten für Fusion bestünden ggf. eher in den Sektoren Industrie und Verkehr und damit nicht primär in der Stromerzeugung, sondern bei Prozesswärme und bei der Herstellung von Energieträgern bzw. Kraftstoffen (Nuttall 2020, S. 11-15) (Kap. 5.3).

In einer globalen Perspektive öffnet sich somit ein Anwendungsfenster für Fusionsenergie vor allem in Szenarien, in denen die Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen nur langsam erfolgt. Auch die Annahme eines langfristig stark ansteigenden Weltenergiebedarfs erhöht die Chancen für Fusionsenergie.

7 Rohstoffe/Ressourcen

Für Fusionskraftwerke werden hochspezialisierte Struktur- und Funktionsmaterialien benötigt. Die Beispiele Helium, Beryllium und Lithium illustrieren unterschiedliche mögliche Engpässe:

Helium als Nebenprodukt der Erdgasförderung könnte sich bei zurückgehender Erdgasförderung verknappen.

Beryllium steht für ein breit angelegtes Fusionsausbauprogramm nicht in ausreichender Menge zur Verfügung.

Lithium ist zwar in genügender Menge verfügbar, allerdings könnten sich die fehlenden Produktionskapazitäten für das benötigte Isotop Li-6 als bedeutendes Hindernis erweisen.

Für Fusionskraftwerke werden hochspezialisierte Struktur- und Funktionsmaterialien benötigt, die sich gegenwärtig noch im Entwicklungsstadium befinden. In diesem Zusammenhang ist eine Reihe von Fragen zu klären. Dies betrifft die Ressourcenverfügbarkeit, die Verfahren zur Herstellung und Verarbeitung sowie die Kosten. Ebenfalls sind mögliche Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen zu berücksichtigen.

Im Rahmen dieser TA-Kompakt-Studie war eine umfassende Bestandsaufnahme und Analyse für fusionsrelevante kritische Rohstoffe nicht möglich. Im Folgenden werden daher lediglich für drei Beispiele – Helium, Beryllium und Lithium – die Problemlagen skizziert.

7.1 Beispiel Helium

Beim gegenwärtigen Entwicklungsstand müssen die Supraleiter für die Magnetspulen mit flüssigem Helium gekühlt werden. Der Verbrauch an Helium beim Betrieb von ITER wird auf etwa 48 t pro Jahr geschätzt. Ein Kraftwerk mit 1.000 MW elektrischer Leistung hätte einen Bedarf von etwa 160 t Helium pro Jahr. Die Weltjahresproduktion belief sich in den letzten Jahren auf stabil etwa 28.500 t. Allerdings wird Helium kommerziell praktisch ausschließlich als Nebenprodukt bei der Erdgasförderung gewonnen. Wenn diese in den nächsten Jahren aus Gründen des Klimaschutzes sukzessive zurückgehen wird, wäre die Heliumproduktion ebenfalls betroffen. Dann wäre zu befürchten, dass für ein breit angelegtes Ausbauprogramm an Fusionskraftwerken nicht genügend Helium zur Verfügung stünde (Stork 2009, S. 104 ff.). Als Alternative käme ggf. die Extraktion von Helium aus der Atmosphäre infrage. Allerdings müssten hierfür mit hohem apparativem Aufwand große Mengen an Umgebungsluft prozessiert werden. Der Energiebedarf hierfür würde in etwa bei 1 % des Outputs des Fusionskraftwerks liegen (Bradshaw/Hamacher 2013, S. 2697).

7.2 Beispiel Beryllium

Beryllium wird als Material für die dem Plasma ausgesetzte erste Wand von Fusionsreaktoren und als Neutronenmultiplikator im Brutblanket diskutiert (Kap. 3.1.1 und 3.2.2). Beryllium ist kein besonders häufiges Element in der Erdkruste. Die bisher nachgewiesenen weltweiten Reserven belaufen sich auf etwa 100.000 t. Die Weltjahresproduktion an Beryllium-Metall betrug 2022 etwa 310 t (USGS 2024, S. 44 f.).

Der Bedarf für das Startinventar der Brutblankets eines 1 GWth Reaktors liegt bei etwa 120 t^{24} , wovon pro Jahr etwa 190 kg verbraucht werden würden (Bradshaw et al. 2011, S. 2772). Die weltweiten Reserven würden somit den Bau von maximal etwa 800 Fusionskraftwerken mit berylliumhaltigen Brutblankets erlauben, was im Sinne der Nachhaltigkeit einen ernsthaften Flaschenhals darstellen würde (Griffiths et al. 2022, S. 15). Falls sich Blanketkonzepte realisieren lassen, die statt Beryllium Blei für die Neutronenvervielfachung nutzen, entspannt sich der Ressourcenengpass zwar etwas, eine Nachhaltigkeit im Sinne von praktisch unerschöpflich wäre dennoch nicht gegeben (Bradshaw et al. 2011, S. 2773).

Beryllium (und auch Blei) haben auch Konsequenzen für das radioaktive Inventar und erzeugte Abfälle eines Fusionskraftwerks. Natürliches Beryllium enthält als Beimengung nicht zu vernachlässigende Mengen an Uran im Bereich von 20 bis 100 ppm. Unter Neutroneneinfluss entstehen somit langlebige Transurane (z.B. Plutonium), die sicher entsorgt werden müssten.

7.3 Beispiel Lithium

Lithium wird in Fusionskraftwerken benötigt, um den Brennstoff Tritium zu erbrüten (Kap. 3.2.2). Natürlich vorkommendes Lithium besteht aus den beiden Isotopen Li-6 (7,6%) und Li-7 (92,4%). Um eine für eine Tritiumselbstversorgung ausreichende Menge zu erbrüten, muss das verwendete Lithium einen deutlich höheren Li-6

²⁴ Unter der Annahme eines heliumgekühlten Feststoffblankets (Helium cooled pebble bed).

Anteil aufweisen. Je nach Brutkonzept kann dies 30 bis 60 % (für festes Brutmaterial) bis zu 90 % (für flüssiges Brutmaterial) sein. In grober Schätzung benötigt ein Kraftwerk mit 2 GW Fusionsleistung ein Inventar von 52 t reinem Li-6. Davon würden pro Reaktorjahr bei voller Auslastung etwa 224 kg verbraucht (Giegerich et al. 2019, S. 2). Unter der Annahme, dass bei der Isotopenanreicherung aus Naturlithium etwa die Hälfte des darin enthaltenen Li-6 extrahiert wird, müssten für das Startinventar etwa 1.350 t Lithium prozessiert werden. Die generelle Verfügbarkeit von Lithium sollte somit bei einer Weltjahresproduktion von gegenwärtig etwa 180.000 t (USGS 2024, S. 111) keinen Flaschenhals für den Aufbau einer Flotte an Fusionskraftwerken sein.

Allerdings könnte dies bei den Anreicherungsanlagen anders aussehen: Bislang wurden solche Anlagen nur von den Nuklearmächten zur Produktion von Kernwaffenmaterialien betrieben. In den USA wurde Li-6 mit dem COLEX-Verfahren in einer Größenordnung von mehreren hundert Tonnen hergestellt. Das Verfahren verwendet ein Quecksilberamalgam und ist heute durch das Minamata-Abkommen (Wikipedia o.J.c) verboten. Ein neues Verfahren zur Herstellung von Li-6 ist derzeit noch nicht etabliert (Griffiths et al. 2022, S. 14 f.).

Der Aufbau einer Anreicherungs Kapazität im notwendigen großindustriellen Maßstab erfordert einen erheblichen zeitlichen Vorlauf. Ausgehend von der Annahme, dass DEMO in den 2050er Jahren in Betrieb gehen soll, kalkulieren Giegerich et al. (2019, S. 7 f.), dass spätestens in den späten 2030er Jahren eine Großanlage ihren Betrieb aufnehmen muss, was wiederum den Baubeginn für eine Pilotanlage um 2025 erfordern würde.

Allerdings ist zu erwarten, dass die Produktionsanlagen und das Isotop selbst aufgrund seiner Relevanz für militärische Anwendungen der Exportkontrolle unterliegen werden, sodass die Versorgung mit Li-6 als bedeutendes Hindernis für die Kernfusion angesehen werden kann (Griffiths et al. 2022, S. 15).

8 Nukleare Sicherheit/Management von radioaktivem Inventar und Abfällen

Im Gegensatz zur Kernspaltung sind bei der Kernfusion naturgesetzlich keine unkontrollierten nuklearen Kettenreaktionen möglich. Bei Störungen der Plasmabedingungen bricht die Energieerzeugung durch Fusion sofort ab.

Generelle Zielstellungen in Bezug auf nukleare Sicherheit für Fusionskraftwerke werden u. a. im DEMO-Designkonzept formuliert. Insbesondere soll sichergestellt werden, dass (Taylor et al. 2019, S. 112):

- im Normalbetrieb die Exposition gegenüber Gefahren innerhalb der Anlage und durch die Freisetzung von Gefahrstoffen aus der Anlage kontrolliert, unter den vorgeschriebenen Grenzwerten gehalten und so weit wie vernünftigerweise erreichbar minimiert wird;
- die Gefahren von Unfällen so begrenzt werden, dass in jedem Fall keine Evakuierung der Bevölkerung aus technischen Gründen erforderlich ist;
- die Gefahren und Mengen radioaktiver Abfälle minimiert werden und so gering wie vernünftigerweise erreichbar sind, d. h. das ALARA-Prinzip (as low as reasonably achievable) soll angewendet werden.

8.1 Radioaktives Inventar und Abfälle

Es wird angestrebt, dass beim Betrieb von Fusionskraftwerken keine langlebigen und hochradioaktiven Abfälle entstehen.

Ob dieses Ziel erreicht werden kann, hängt davon ab, welche Fortschritte bei der Materialentwicklung in den nächsten Jahren erzielt werden.

Anders als bei der Kernspaltung entstehen bei der Fusionstechnologie keine langlebigen hochradioaktiven Abfälle aus abgebrannten Kernbrennstoffen.

Es besteht Bedarf an einer vorausschauenden und umfassenden Strategie für die Vermeidung und für die Entsorgung radioaktiver Abfälle.

Dass keine langlebigen hochradioaktiven Abfälle aus abgebrannten Kernbrennstoffen entstehen, ist einer der wesentlichen Vorteile der Fusionstechnologie gegenüber der Kernspaltung. Dennoch enthalten Fusionskraftwerke ein nicht zu vernachlässigendes radioaktives Inventar. Direkt nach der Abschaltung weist ein Fusionskraftwerk mit einem Tokamak-Referenzdesign in etwa eine Radiotoxizität auf, die hundert Mal größer ist als die eines herkömmlichen Druckwasser-Kern(spaltungs)kraftwerks (einschließlich der Brennelemente) (Zucchetti et al. 2018, S. 1532).

Diese klingt allerdings im Laufe der Zeit sehr viel schneller ab als bei Kernspaltung. Eine häufig herangezogene Zielsetzung für die radioaktiven Abfälle aus Kernfusion lautet, dass sie etwa 100 Jahre nach der Entfernung aus dem Reaktor soweit abgeklungen sein sollen, dass eine Wiederverwendung oder eine Entsorgung in Deponien für schwachradioaktiven Abfall möglich ist (Gorley 2015). Eine Endlagerung über geologische Zeiträume soll nicht erforderlich werden. Ob diese Zielsetzung erreicht werden kann, hängt entscheidend vom Reaktordesign und der Beschaffenheit der verwendeten Materialien ab.

Die erwarteten Mengen an schwach- und mittelradioaktiven Abfällen sind erheblich größer als bei Kern(spaltungs)kraftwerken. Dabei handelt es sich zum einen um Materialien, die durch Neutronenbestrahlung radioaktiv werden, und zum anderen um tritiumhaltige Komponenten, die entstehen, weil Tritium in sehr viele Materialien leicht diffundiert.

8.1.1 Aktivierungsprodukte

Bestimmte chemische Elemente werden unter Neutroneneinwirkung radioaktiv. Dies schränkt die Auswahl an Materialien, die für den Bau von Reaktorkomponenten infrage kommen, erheblich ein. Aber auch wenn die Materialien mit Bedacht ausgewählt werden, können geringe Mengen an Verunreinigungen einen erheblichen Einfluss auf die Eigenschaften der entstehenden radioaktiven Abfälle haben (Pearson 2020, S. 10-18). Daraus könnten erhöhte Anforderungen an die Reinheit der verwendeten Materialien resultieren, was einen zusätzlichen Aufwand für Reinigungsschritte und unter Umständen erhebliche Kosten nach sich ziehen könnte.

Beispiel Beryllium

Beryllium, das in Brutblankets als Neutronenmultiplikator vorgesehen ist, enthält gewöhnlich Beimengungen von Uran im Bereich von 20 bis 100 ppm. Bei einer Gesamtmenge von 300 bis 400 t im Blanket eines Fusionsreaktors der DEMO Größenklasse würde das einer Uranmenge von etwa 6 bis 40 kg entsprechen. Damit ist im Kraftwerksbetrieb damit zu rechnen, dass nicht zu vernachlässigende Mengen an Transuranen (u. a. Plutonium) entstehen (Gonzalez De Vicente et al. 2022, S. 8).

Beispiel Stahl

Einige der am häufigsten zur Herstellung hochwertiger Stahlliegierungen verwendeten Elemente, wie Molybdän, Niob, Nickel oder Wolfram, müssen in Stählen, die als Strukturmaterial für Fusionskraftwerke vorgesehen sind, vermieden werden (Gorley 2015, S. 976). So eignen sich etwa Chrom-Nickel-Edelstähle (z. B. V2A und V4A), die für Anwendungen aller Art breit eingesetzt werden, nicht für Fusionskraftwerke. Denn deren Nickelgehalt (z. B. etwa 12,5 Gewichts-%) würde die Radioaktivität in den für Rückbau, Recycling und Entsorgung relevanten Zeitskalen auf sehr hohe Werte ansteigen lassen (Gonzalez De Vicente et al. 2022, S. 8). Auch bei Stahlsorten mit deutlich reduziertem Nickelgehalt – etwa EUROFER97, dem europäischen Referenzmaterial für DEMO (Chen et al. 2019) – ist fraglich, ob sie nach 100 Jahren für eine oberflächennahe Deponierung ausreichend abgeklungen wären (Gonzalez De Vicente et al. 2022, S. 8 f.). Nicht nur Legierungskomponenten, sondern auch Verunreinigungen mit Spurenelementen können die Radioaktivität von Materialien entscheidend beeinflussen. So führt beispielsweise ein Niobgehalt im Bereich von 1 ppm bereits dazu, dass Abfälle als hochradioaktiv eingestuft werden müssten (nach US-Klassifikation) (Gonzalez De Vicente et al. 2022, S. 9).

Berechnungen der zu erwartenden Aktivierung am Beispiel eines Reaktors vom Typ DEMO deuten darauf hin, dass insbesondere der Stahl des Vakuumgefäßes und des Divertors nach der Abschaltung viele Jahrzehnte (oder sogar Jahrhunderte) lang als mittelaktiver Abfall verbleiben wird, bevor er so weit abgeklungen ist, dass eine Neueinstufung als schwachradioaktiver Abfall möglich ist. Weder das Vakuumgefäß noch die Komponenten innerhalb des Behälters (Blanket und Divertor) klingen innerhalb von 1.000 Jahren ausreichend ab, um den IAEA-Grenzwert für die Freigabe als nichtaktiven Abfall zu erfüllen (Gilbert et al. 2017, S. 13).

8.1.2 Tritium

Tritium hat die Eigenschaft, in sehr viele Materialien, z. B. Metalle oder Beton, zu diffundieren. Somit werden plasmanahen Strukturen und die Komponenten des Tritiumbrennstoffkreislaufs Tritium enthalten. Bei Komponenten, wie etwa der ersten Wand, ist von hohen Aktivitäten im Bereich $> 10^8$ Bq/g auszugehen. Der Umgang mit tritiumhaltigen Abfällen spielt damit eine Schlüsselrolle bei der Frage der Entsorgung (Gonzalez De Vicente et al. 2022, S. 10).

Es ist absehbar, dass Anstrengungen unternommen werden müssen, um das Tritium aus den Abfällen zurückzugewinnen. Dabei geht es nicht nur um die Wiederverwendung als Brennstoff, sondern auch um die Verringerung möglicher Freisetzungen in die Umwelt in den Lager- und Entsorgungseinrichtungen. Verfahren, die hierfür zurzeit im Labormaßstab untersucht werden, nutzen typischerweise hohe Temperaturen (z. B. 800 °C), um das Tritium aus den Materialien auszutreiben. Um diese in einem für Fusionskraftwerke notwendigen Maßstab einsetzen zu können und gleichzeitig Tritiumemissionen bei der Abfallbehandlung zu minimieren, ist noch ein erheblicher Entwicklungsaufwand notwendig (Gonzalez De Vicente et al. 2022, S. 5).

Weltweit haben bisher nur einige wenige Fusionsexperimente mit Tritium stattgefunden. Die eingesetzten Mengen waren im Vergleich zum Leistungsbetrieb eines Kraftwerks winzig. So wurden etwa am Tokamak Fusion Test Reactor (TFTR) in Princeton (USA) von 1993 bis 1997 insgesamt etwa 5 g Tritium in das Vakuumgefäß des Plasmas eingebracht. Neben den gewonnenen plasmaphysikalischen Ergebnissen war ein Ziel dieser Versuche, Technologien zu erproben, die für Stilllegung und Rückbau der radioaktiven Anlagenteile von Fusionskraftwerken notwendig sein werden (Gentile et al. 2003). Es wurde deutlich, dass dies eine komplexe und kostspielige Aufgabe ist (Gonzalez De Vicente et al. 2022, S. 3). Obwohl das Vakuumgefäß mit lediglich etwa 0,5 g Tritium kontaminiert war, dauerte der Prozess 3 Jahre und kostete etwa 37 Mio. US-Dollar (Perry et al. 2003).

8.1.3 Strategien für die Vermeidung und Entsorgung radioaktiver Abfälle

Durch sorgfältige Materialauswahl und Reduzierung des Gehalts von problematischen Elementen sollte es möglich sein, die Erzeugung von hochradioaktiven Abfällen zu vermeiden. Allerdings ist das Volumen an schwach- und mittlerradioaktiven Abfällen bei Fusionskraftwerken über den gesamten Nutzungszyklus wesentlich größer als bei herkömmlichen Kernspaltungskraftwerken. So würden bei einem DEMO-Reaktordesign bei der Kraftwerksstillegung etwa 10.000 t feste Abfälle allein aus dem Plasmagefäß und den umgebenden Strukturen resultieren (Gonzalez De Vicente et al. 2022, S. 4). Auch im Betrieb würden größere Mengen Abfälle entstehen, da hochbelastete Bauteile (Divertoren, erste Wand, Brutblankets) regelmäßig etwa alle 5 bis 10 Jahre ausgetauscht werden müssen. Bestehende Lagerkapazitäten sind für solche zusätzlichen Mengen nicht vorhanden.

Die Entsorgung in Endlagern ist somit keine praktikable Lösung. Sie wäre auch weder eine ökologisch noch eine wirtschaftlich attraktive Option. Hinzu kommt, dass die bestehenden Deponien für schwach- und mittelaktive Abfälle nicht auf die Behandlung des tritiumhaltigen Fusionsabfalls vorbereitet sind. Es ist daher unerlässlich, eine Strategie zur Begrenzung des radioaktiven Abfalls für die Fusionsenergie zu entwickeln (El-Guebaly 2023).

Zur Minimierung der Abfälle kommt Bemühungen um die Wiederverwendung von strahlenbelasteten Materialien durch Recycling eine hohe Bedeutung zu. Auch ökonomische Argumente sprechen dafür, denn auf diese Weise könnten langfristig potenziell hohe Entsorgungskosten eingespart werden (Gonzalez De Vicente et al. 2022, S. 4).

Hier besteht erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, zum Beispiel bei fortgeschrittenen Fernbedienungstechnologien, mit denen es im Prinzip möglich sein könnte, sämtliche Materialien eines Fusionsreaktors nach etwa 1 Jahr Abklingzeit wiederzuverwenden. Ebenso müssen Verfahren zur großtechnischen Detritierung aller Komponenten entwickelt werden, nicht zuletzt, weil ein zu hoher Tritiumgehalt den Recyclingprozess erschweren würde (Gonzalez De Vicente et al. 2022, S. 11). Wie wirtschaftlich ein Recycling wäre, ist derzeit nicht abzuschätzen, es gibt allerdings Beispiele, wo ein Recycling günstiger war als die Deponierung als schwachradioaktiver Abfall (El-Guebaly 2023).

Nicht zuletzt ist eine Abfallstrategie von Bedeutung, weil große Abfallmengen die öffentliche Wahrnehmung als saubere zukünftige Energiequelle infrage stellen könnten (Gonzalez De Vicente et al. 2022, S. 14). Dieser Fall könnte auch eintreten, wenn Aussagen wie die, dass bei einem Fusionskraftwerk „keine Endlagerung über einen Zeitraum von etwa 100 Jahren hinaus notwendig“ sei (BMBF 2024), nicht klar als Entwicklungsziel benannt, sondern missverständlich als eine inhärente Eigenschaft der Fusionstechnologie dargestellt werden. Experten warnen davor, dass sich hier ein „PR-Desaster im Wartestand“ abzeichnen könnte (Pearson 2020, S. 10-17 FN 12).

8.2 Störfälle

Eine wesentliche Zielsetzung bei Fusionskraftwerken für den Umgang mit Störfällen ist, dass auch beim schlimmsten anzunehmenden Unfall (durch interne Störungen oder durch externe Einwirkungen verursacht) keine Evakuierungen von Anwohnern erforderlich sein sollte (no evacuation objective) (Taylor et al. 2019, S. 112). Das mobile radioaktive Inventar, das bei möglichen Störfällen freigesetzt werden könnte, besteht im Wesentlichen aus Tritium sowie aus Staub, der sich durch Erosion von Materialien bildet, die mit dem Plasma in Kontakt kommen. Schätzungen über die Größe dieses Inventars sind derzeit noch unsicher, da sie vom konkreten Reaktordesign abhängen. Ausgehend vom DEMO-Design wird eine Spanne von rund 700 bis 4.500 g für Tritium und 700 bis 1.400 g für Staub geschätzt (Taylor et al. 2019, S. 113).

Im hypothetischen Fall, dass nach einem Schadenereignis das gesamte mobile radioaktive Inventar freigesetzt werden würde, würden die radiologischen Konsequenzen voraussichtlich in der Größenordnung des Grenzwerts für eine Evakuierung liegen (GRS 2013, S. 122). Um solche Freisetzungen auszuschließen, ist ein fusionspezifisches Sicherheitskonzept erforderlich (Nie et al. 2021, S. 14). Dabei muss auch festgelegt werden, welche externen Schadensereignisse zugrunde gelegt werden (Erdbeben, Überschwemmung, Absturz eines Verkehrsflugzeugs, kriegerische oder terroristische Handlungen etc.). Die Überlegungen für ein Sicherheitskonzept gehen üblicherweise von gestaffelten Sicherheitsebenen (Defence in Depth) aus.

In Bezug auf interne Störungen und mögliche Schadensereignisse sind die fusionspezifischen Technologien im Detail zu betrachten. Dies ist im Rahmen dieser TA-Kompakt-Studie nicht möglich. Generelle Überlegungen zu fusionspezifischen Sicherheitskonzepten wurden von (GRS 2013, S. 121 f.) angestellt. Eine Beschreibung und erste Einschätzung sicherheitsrelevanter Eigenschaften einiger der zentralen Komponenten eines Fusionskraftwerks, wie z.B. supraleitende Magnetspulen, Vakuumgefäß, Brutblankets, Divertoren und Primärkühlsystem,

wird in (GRS/KIT 2021, S. 32 ff.) vorgenommen. Im Kasten 8.1 wird exemplarisch das Beispiel möglicher Störfälle bei Magnetspulen dargestellt. Anhand der Sicherheitsanalyse, die im Rahmen des Genehmigungsverfahrens von ITER durchgeführt wurden, lassen sich für DEMO unter Berücksichtigung der erwarteten technischen und betrieblichen Unterschiede einige Schlussfolgerungen ableiten (IRSN 2017; Perrault 2019). Im Kasten 8.2 wird dies am Beispiel der Abfuhr von Nachzerfallswärme beschrieben.

Kasten 8.1 Störfälle bei Magnetspulen

Die im Magnetfeld der Spulen rund um die Plasmakammer gespeicherte Energie ist enorm. Es wird eine Größenordnung von 100 bis 200 GJ angegeben. Zum Vergleich: Die Explosion einer Tonne TNT setzt eine Energie von 4,6 GJ frei. Wenn es durch eine Fehlfunktion zu einer Entladung auch nur eines gewissen Teils dieser Energie etwa in die Wand des Vakuumgefäßes kommt, sind strukturelle Schäden, z. B. durch Schmelzen von Stahl, unvermeidlich.

Auslösendes Ereignis könnte ein Quench sein. Das ist der plötzliche Verlust der supraleitenden Eigenschaft des Spulenmaterials, etwa durch lokale Überschreitung von Temperatur, Magnetfeldstärke oder Stromdichte. Da die Spulen sich dann im normalleitenden Zustand befinden, heizen sie sich durch ihren elektrischen Widerstand schnell auf. In der Folge verdampft schlagartig das flüssige Helium, das die Spulen kühlt.

ITER verfügt beispielsweise über Fast Discharge Units (Einheiten für schnelle Entladung), deren Aufgabe es ist, im Fall einer Magnetfehlfunktion die Energie schnell und sicher abzuleiten. Da die magnetische Energie in Fusionskraftwerken eher höher sein wird als in ITER, werden solche Schutzsysteme essenziell für den sicheren Betrieb sein.

Das Wissen über mögliche Störfälle mit den Magnetspulen und der darin gespeicherten Energie ist derzeit noch lückenhaft. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um das potenzielle Risiko besser bewerten zu können (Lukacs/Williams 2020, S. 2 f. u. 9; GRS/KIT 2021, S. 32).

Kasten 8.2 Abfuhr von Zerfallswärme

Durch die Fusionsneutronen entstehen radioaktive Elemente, die durch ihre Zerfallsprozesse Energie freisetzen, auch nachdem der Fusionsbetrieb abgeschaltet wurde. Bei ITER entsteht relativ wenig Zerfallswärme: etwa 11 MW direkt nach Abschaltung und 0,6 MW nach 1 Tag. Aufgrund der höheren Fusionsleistung und des längeren Betriebs ist diese Wärmeproduktion bei DEMO und ggf. nachfolgenden kommerziellen Kraftwerken sehr viel höher. Angegeben werden 80 MW direkt bzw. 30 MW nach 1 Tag. Wenn die Kühlsysteme ausfallen, würde die Temperatur von Bauteilen nach ca. 10 Tagen auf etwa 1.000 °C ansteigen, was Schäden am Reaktor und im ungünstigen Fall die Freisetzung radioaktiver Aerosole nach sich ziehen könnte.

Das Brutblanket muss regelmäßig ausgetauscht und zur Tritiumextraktion transferiert werden. Blanketmodule sind verhältnismäßig groß und schwer (im Bereich von 10 t und mehr). Daher müssen sie auf dem Weg vom Fusionsreaktor zur Tritiumextraktionsanlage zuverlässig und ausfallsicher gekühlt werden. Das stellt eine wesentliche Anforderung beim Design der Blankets, der ferngesteuerten Transfersysteme und der Kühlkomponenten dar (IRSN 2017, S. 47 f.).

Allgemein fehlen für eine robuste Sicherheitsanalyse beim gegenwärtigen Stand der Entwicklung der Fusionstechnologie noch verlässliche Daten zu den zu erwartenden Ausfallraten von Komponenten und Systemen. Die Erstellung einer entsprechenden Datengrundlage ist eine wichtige Voraussetzung für das Design und den sicheren Betrieb künftiger Fusionskraftwerke (Lukacs/Williams 2020, S. 9). Diese Daten sollten international verfügbar gemacht werden (Recommendation 8 in Elbez-Uzan et al. 2023).

9 Dual Use und Proliferationsrisiken

In Fusionskraftwerken werden keine spaltbaren Stoffe verwendet, die sich für die Produktion von Kernwaffen eignen (vor allem hochangereichertes Uran und Plutonium). Dies unterscheidet sie von Kern(spaltungs)kraftwerken und ist ein klarer Vorteil hinsichtlich möglicher Proliferationsrisiken. Dennoch gehen von Fusionskraftwerken – wenn auch begrenzte – Proliferationsrisiken aus. Drei Punkte sind hier hervorzuheben:²⁵

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

Dabei ist jeweils akteursbezogen zu unterscheiden, ob sich die Analyse auf einen Kernwaffen- oder einen Nichtkernwaffenstaat gemäß dem Nuklearen Nichtverbreitungsvertrag (Non-Proliferation Treaty – NVV) bezieht. Zu den im NVV anerkannten Kernwaffenstaaten gehören die Vereinigten Staaten, Russland, China, Frankreich und England. Nicht Mitglied im NVV sind die Kernwaffenstaaten, Indien, Pakistan, Nordkorea und Israel.

9.1 Tritium

Tritium ist als Sprengkraftverstärker ein Bestandteil fortgeschrittener Kernwaffendesigns

Um zuverlässig zu verhindern, dass militärisch relevante Mengen Tritium aus Fusionskraftwerken abgezweigt werden, ist ein äußerst hoher apparativer und administrativer Aufwand erforderlich.

Tritium wird vor allem in fortgeschrittenen Waffensystemen und Kernwaffenprogrammen der Kernwaffenstaaten eingesetzt. Aufgrund der technischen Fortschritte der letzten Jahrzehnte wurde der Einsatz von Tritium in Kernwaffen auch für Staaten mit weniger ausgeprägten technischen Fähigkeiten möglich.

Tritium dient in modernen Kernwaffen zur Verstärkung ihrer Sprengkraft und zur Verbesserung ihrer Zuverlässigkeit. In einem typischen Sprengkopf finden Mengen von wenigen Gramm Verwendung (< 20 g). Die Menge an Tritium, die allein beim Betrieb eines einzelnen Fusionskraftwerks umgesetzt wird (Kap. 3.2), übersteigt die existierenden Tritiumvorräte der Atommächte mutmaßlich um mindestens einen Faktor 10. Da die Produktion von Tritium zu militärischen Zwecken zumindest in den USA in der Vergangenheit einige Probleme bereitet hat (GAO 2010), kämen Fusionskraftwerke als Option hierfür ggf. infrage. Dass Fusionskraftwerke u. a. für das Startinventar neuer Kraftwerke einen Tritiumüberschuss produzieren müssten, würde eine Abzweigung für ein militärisches Programm erleichtern.

Um zu verhindern, dass kleine, aber dennoch militärisch relevante Mengen Tritium aus einem Fusionskraftwerk abgezweigt werden, müsste eine Materialbilanz mit einer Genauigkeit erstellt werden, die einen extrem hohen apparativen und administrativen Aufwand erfordern würde. Kritische Stimmen befürchten, dass selbst der Verlust von 100 g Tritium nicht mit genügend hoher Sicherheit auffallen würde (Franceschini et al. 2013).

Derzeit gibt es weltweit keine Überwachungsmaßnahmen (Safeguards) für Tritium, so wie sie für Spaltstoffe durch die IAEA existieren. Es gibt jedoch seit vielen Jahren die Forderung, der Tritiumproblematik mehr Aufmerksamkeit zu widmen (IAEA 2014) bzw. ein adäquates Überwachungssystem zu schaffen (Kalinowski 1993 u. 2004; Kalinowski/Colschen 1995). Im Sinne einer Minimierung der Proliferationsrisiken durch Tritium wären die Entwicklung und internationale Implementierung von effektiven Überwachungsmaßnahmen geboten. Es wäre daher anzuraten, dass solche Maßnahmen von Anfang an in Anlagendesigns ziviler Fusionskraftwerke mit eingeplant werden (Safeguards by Design), um spätere Überraschungen zu vermeiden.

²⁵ Dieses Kapitel beruht wesentlich auf einer Kurzstellungnahme, die Dr. Matthias Englert (Öko-Institut) im Rahmen der vom TAB durchgeführten Interviews mit Expert/innen erstellt hat.

9.2 Produktion von Spaltmaterial

Die Erbrütung von waffenfähigem Plutonium in einer für Sprengköpfe ausreichenden Menge ist in Fusionskraftwerken technisch möglich.

Die hierfür notwendigen Umrüstungen (etwa die Installation von uranhaltigen Brutblankets) sind leicht detektierbar. Voraussetzung ist, dass Überprüfungsmaßnahmen entwickelt und international umgesetzt werden.

Da Fusionskraftwerke beträchtliche Mengen an Neutronen erzeugen, könnte spaltbares waffentaugliches Material wie Plutonium in erheblichen Mengen in den Blankets eines Fusionsreaktors erzeugt werden. Die Blankets dienen eigentlich dazu, Tritium zu erbrüten sowie die Fusionsenergie in Wärmeenergie umzuwandeln und abzuführen. Wird Uran in die Blankets eingebracht (z. B. als feste Strukturen, gelöst in einem flüssigen Blanketmaterial oder auch in Form kleinster Partikel) und mit Neutronen bestrahlt, entsteht Plutonium. Derselbe Vorgang findet auch in Kern(spaltungs)reaktoren statt.

Überschlagsrechnungen für die Menge an Spaltmaterial, die hypothetisch in Fusionskraftwerken erzeugt werden könnte, zeigen, dass selbst mit moderaten Eingriffen in das Blanket (z. B. Austausch eines von ca. 30 Blanketmodulen durch eins mit einem Urangehalt von 1 %) so viel Plutonium entstehen würde, dass es für einen Sprengkopf pro Jahr ausreichen würde (Franceschini et al. 2013, S. 542).

Aufgrund der hohen Neutronenenergien ist das entstehende Plutonium waffentauglich, d. h., der Anteil des Isotops Plutonium-239 beträgt mehr als 93 %. Selbst mit Mengen an Ausgangsmaterial (abgereichertes oder Natururan), die nach den IAEA-Bestimmungen von Safeguards ausgenommen werden können (< 10 t Natururan), sind in Fusionskraftwerken signifikante Mengen an Plutonium (> 8 kg/Jahr) produzierbar (Englert/Harrington 2016). Das Uran und das entstandene Plutonium müssten nach der Entstehung aus den Blankets entfernt und Plutonium von Uran separiert werden. Hierfür steht etwa der PUREX-Prozess zur Verfügung, der für die Wiederaufbereitung abgebrannter Brennelemente entwickelt wurde (Wikipedia o.J.e).

In reinen Fusionskraftwerken ist kein fertiles Material, d. h. solches, aus dem Spaltstoffe erbrütet werden können, wie Uran, im Anlagendesign vorgesehen. Es müssten daher gewisse Umrüstungen der Anlage vorgenommen werden. Ob fertiles Material (Uran oder etwa auch Thorium) in einem Fusionsreaktor mit Neutronen bestrahlt wird, sollte technisch gesehen relativ problemlos überprüfbar sein, z. B. anhand der Detektion von flüchtigen Spaltprodukten oder durch Gewichtsüberprüfung von Anlagenteilen oder des Kühlmittels.

Es wäre sinnvoll, entsprechende Methoden frühzeitig zu entwickeln, zu erproben und im Anlagendesign zukünftiger Fusionskraftwerke zu integrieren (Safeguards by Design). Entsprechende Forschungsprogramme könnten z. B. im Rahmen des ITER-Versuchsreaktors durchgeführt werden (Diesendorf et al. 2023; Franceschini et al. 2013; IAEA 2014). Der ITER-Reaktor selbst stellt vor allem aufgrund des insgesamt gesehen geringen Neutronenaufkommens kein Proliferationsrisiko hinsichtlich der Spaltmaterialproduktionsmöglichkeiten dar (IAEA 2014).

Daneben gibt es seit vielen Jahrzehnten Überlegungen, Fusion-Fission-Hybridreaktoren zu konzipieren. Bei diesem Ansatz werden die schnellen Fusionsneutronen dafür genutzt, Kerne zu spalten, die durch die deutlich langsameren Neutronen aus der Kernspaltung nicht spaltbar sind (beispielsweise Uran-238 oder Thorium-232). Mit den damit ausgelösten Kernreaktionen kann die Ausbeute sowohl an Energie als auch an Neutronen vervielfacht werden (Wikipedia o.J.d). Diese Konzepte könnten an Attraktivität gewinnen, wenn das Ziel der Tritiumselbstversorgung von Fusionskraftwerken auf anderem Weg nicht erreicht werden kann (Kap. 3.2).

Der Rahmen für die Einbeziehung von Fusionskraftwerken in die derzeitigen Verifizierungsregelungen der IAEA ist unklar (Englert/Harrington 2016). Auf reine Fusionsanlagen treffen viele Definitionen, die sich auf die Kernspaltung beziehen, nicht zu. Insbesondere ist im regulären Betrieb der Einsatz von spaltbaren und fertilen Materialien nicht vorgesehen. Viele Überwachungsmaßnahmen beziehen sich aber spezifisch auf die Materialflüsse von Spaltmaterial (Plutonium, Uran-233, Uran-235) und fertilem Material (z. B. Uran-238, Thorium) in den dazugehörigen Brennstoffkreisläufen von Spaltreaktoren. Eine entsprechende Klärung der Verifizierungsregelungen für reine Fusionskraftwerke wäre daher für die zukünftige Nutzung von Fusionskraftwerken anzuraten (IAEA 2014), da angemessene internationale Überwachungsmaßnahmen im Hinblick auf Spaltmaterial unausweichlich sind. Fusion-Fission-Hybridanlagen würden aufgrund der Auslegung immer spaltbares Material enthalten und daher von den derzeitigen Überwachungsmaßnahmen erfasst werden.

Das Potenzial zur Erbrütung von Spaltmaterial ist sowohl im Rahmen eines Ausbaus des Kernwaffenarsenals eines Kernwaffenstaats – man spricht hier von vertikaler Proliferation – als auch für eine Strategie latenter Proliferation für einen Nichtkernwaffenstaat (horizontale Proliferation, also Weiterverbreitung) relevant. Eine solche Strategie könnte so aussehen, dass sich ein staatlicher Akteur mithilfe ziviler Dual-Use-Technologien eine möglichst umfangreiche Infrastruktur mit den entsprechenden technischen Anlagen, Zugang zu Materialien und wissenschaftlichen Einrichtungen errichtet. Damit würde Know-how aufgebaut, ohne die Schwelle zu einem militärischen Programm zu überschreiten. Falls in Zukunft eine Entscheidung für ein Verlassen des NVV und den Beginn eines militärischen Programms oder für ein heimliches Parallelprogramm fallen sollte, könnte mit diesem Know-how die Waffenentwicklung deutlich beschleunigt werden.

9.3 Fortgeschrittene Kernwaffenexperimente

Experimentellen Einrichtungen der Laser-/Trägheitsfusion und der dazu entwickelten Simulationsmethoden sind dazu geeignet, Know-how für die Entwicklung von Kernwaffen zu generieren.

Nichtkernwaffenstaaten könnten auf diese Weise versuchen, die Einschränkung zur Entwicklung bzw. Weiterentwicklung von Kernwaffen durch den umfassenden Teststoppvertrag zu umgehen.

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

Die Weiterentwicklung von Kernwaffen hat jedoch in den fortgeschrittenen Kernwaffenstaaten in milliarden-schweren Programmen zur Simulation aller wesentlichen Eigenschaften von Kernwaffen mithilfe leistungsstarker Supercomputerarchitekturen stattgefunden. Die Virtualisierung wird unterstützt durch umfangreiche Experimentaleinrichtungen zur Gewinnung relevanter Daten. Ein Kernbereich davon sind experimentelle Daten zum Zustand von Materie unter extrem hohen Drücken und Temperaturen. In den USA wurde diese Mission durch die Laser-/Trägheitsfusionsanlage der NIF an der Lawrence Livermore National Laboratory im Rahmen des Stockpile Stewardship Program (Programm zur Instandhaltung des Kernwaffenarsenals) durchgeführt.

Die NIF hat eine überwiegend militärisch geleitete wissenschaftliche Mission (Gusterson 2009). Nur als Nebenzweck fand auch Forschung zu zukünftigen zivilen Anwendungen der Laser-/Trägheitsfusion zur Energiegewinnung statt. In jüngerer Zeit wird diese zivile Seite der Forschung stärker betont und die Forschungseinrichtung öffnet sich hin zur Energieforschung. Das französische Pendant zur NIF, der Laser Mégajoule (LMJ), hat ebenfalls eine überwiegend militärische Mission.

Die Dual-Use-Möglichkeit der Nutzung von experimentellen Einrichtungen der Laser-/Trägheitsfusion und der dazu entwickelten Simulationsmethoden ermöglicht auch bei der Entwicklung einer rein zivilen Anlage eine latente Proliferationsstrategie (horizontale Proliferation) für Nichtkernwaffenstaaten. Nichtkernwaffenstaaten könnten sich dadurch die Strategie der Kernwaffenstaaten (vertikale Proliferation) zu Nutze machen, Kernwaffentests in eine virtuelle Umgebung zu verlagern und damit die Einschränkung zur Entwicklung bzw. Weiterentwicklung von Kernwaffen durch den umfassenden Teststoppvertrag zu umgehen.

Diese Thematik wird in manchen Policy Papern zur Laser-/Trägheitsfusion weitgehend ausgespart, etwa im „Memorandum Laser Inertial Fusion Energy“ der BMBF-Expertenkommission. Dort heißt es lediglich (BMBF Expertenkommission 2023, S.4): „Hierzu ist anzumerken, dass die Dual-Use-Bedenken hinsichtlich IFE (Inertial Confinement Fusion) auf bestimmte Designtechnologien beschränkt sind und nicht auf IFE-Anlagen im Allgemeinen zutreffen.“

Um eine konkretere Einschätzung zur Ausrichtung von Fusionsprogrammen zu erleichtern, sollte genauer spezifiziert werden, wie eine Abgrenzung der zivilen von der militärischen Nutzung des Know-hows (experimentelle Daten, Simulationsmethoden) vorgenommen werden soll.

Kasten 9.1 Einbeziehung der Expertise der Fusionsforschenden

Zu treffende Sicherheitsvorkehrungen bei Kernfusionskraftwerken sollten einerseits die möglichen Risiken der Weiterverbreitung von Kernwaffentechnologie oder -materialien effektiv begrenzen, andererseits aber die Nutzung und Weiterentwicklung der Kernfusionstechnologie nicht über das unvermeidbare Maß hinaus behindern.

Damit dies sichergestellt werden kann, ist die Einbeziehung der Expertise aus der Fusionsforschung und -entwicklung unerlässlich. Da bereits in frühen Phasen der Entwicklung von Fusionskraftwerkskonzepten Weichen gestellt werden, die hohe Relevanz für spätere Proliferationsrisiken haben können, ist ein frühzeitiger Dialog anzuraten. Weiterhin besteht bei dieser Thematik ein substantieller Forschungsbedarf. Dies wurde auch deutlich in den beiden Anhörungen, die im Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung am 27. September 2023²⁶ und am 3. Juli 2024²⁷ stattfanden.

Aufgrund der starken europäischen Vernetzung der Fusionsforschung – nicht zuletzt im Rahmen von EURATOM – und der internationalen Relevanz der Proliferationsthematik, ist zu erwägen, diesen Dialogprozess nicht nur national, sondern vor allem auch auf europäischer Ebene zu initiieren.²⁸

²⁶ https://www.bundestag.de/ausschuesse/a18_bildung_forschung/oeffentliche_anhoerungen/965810-965810

²⁷ https://www.bundestag.de/ausschuesse/a18_bildung_forschung/oeffentliche_anhoerungen/1010504-1010504

²⁸ In den USA wurde ein ähnlicher Dialogprozess im Rahmen von Workshops, die am Princeton Plasma Physics Laboratory stattfanden, angestoßen (<https://sites.google.com/pppl.gov/nonproliferationworkshop/home>).

10 Regulierung

Es wird derzeit eine intensive Fachdebatte darüber geführt, welcher der verschiedenen international existierenden Regulierungsansätze für zukünftige Fusionskraftwerke sinnvoll und angemessen ist.

Es ist allerdings kaum vorstellbar, dass eine transnationale gemeinsame Regulierung von Fusionskraftwerken erreicht werden kann. Denkbar ist hingegen, gemeinsame Schutzniveaus zu definieren.

Zurzeit wird in Deutschland und weltweit eine intensive Fachdebatte geführt, welche Form von Regulierung für zukünftige Fusionskraftwerke sinnvoll und angemessen ist. Ein Kernpunkt der Debatte ist, ob ihre Regulierung auf dem Atomrecht oder auf dem Strahlenschutzrecht beruhen soll. Fusionskraftwerke fallen hier gewissermaßen in eine Regelungslücke, denn einerseits werden sie ein wesentlich geringeres radiologisches Gefahrenpotenzial aufweisen als Kern(spaltungs)kraftwerke, für die das Atomrecht greift. Andererseits wird ihr Gefahrenpotenzial voraussichtlich deutlich größer sein als bei typischen nach dem Strahlenschutzrecht genehmigten Anlagen (z. B. Teilchenbeschleuniger für naturwissenschaftliche Experimente oder Anlagen zur medizinischen Anwendung ionisierender Strahlung oder radioaktiver Elemente). ITER als erste Fusionsanlage weltweit, bei der ein Umgang mit Tritium im kg-Maßstab geplant ist, hat ein atomrechtliches Genehmigungsverfahren als „nukleare Basiseinrichtung“ nach französischem Recht durchlaufen (GRS/KIT 2021, S. 27; WD 2023).

International sind die Herangehensweisen bei den Genehmigungsverfahren nuklearer Anlagen sehr unterschiedlich. Allgemein gibt es zwei grundlegend verschiedene Ansätze. Beim *präskriptiven* Ansatz werden konkrete Anforderungen an die verwendeten Technologien gestellt, die einzuhalten sind. Dies kann so weit gehen, dass etwa der Einsatz bestimmter Rückhaltesysteme vorgeschrieben wird. Beim *zielorientierten* Ansatz werden dagegen Schutzziele vorgegeben, etwa hinsichtlich der Rückhaltung radioaktiven Inventars. Auf welche Weise diese Schutzziele erreicht werden, ist dem Antragsteller überlassen, allerdings ist hierfür ein Nachweis zu erbringen. Beide Ansätze haben Vor- und Nachteile. Der präskriptive Ansatz ist deutlich einfacher bei etablierten Technologien, denn es ist von Anfang an klar, wie die Anforderungen erfüllt werden können. Bei neuartigen Technologien ist dies schwieriger, denn die relevanten Anforderungen müssen erst entwickelt und ggf. permanent überarbeitet werden, wenn das Wissen über die infrage stehende Technologie wächst. Dies kann viel Zeit in Anspruch nehmen. Beim zielorientierten Ansatz hat der Antragsteller zwar viele Freiheiten, wie das definierte Schutzziel erreicht werden soll, allerdings kann die Überprüfung und Validierung der vom Antragsteller gelieferten Nachweise eine intensive und tiefgehende Prüfung erfordern (GRS/KIT 2021, S. 27 f). In der Fusionscommunity wird ein zielorientierter Ansatz favorisiert (Recommendation 1 in Elbez-Uzan et al. 2023).

Da die Regulierung kerntechnischer Anlagen international auf Grundlage sehr unterschiedlicher Rechtssysteme erfolgt, ist eine transnationale gemeinsame Regulierung von Fusionskraftwerken kaum vorstellbar. Denkbar sind hingegen harmonisierte Ansätze, die gemeinsame Schutzniveaus definieren, ähnlich wie sie für Kernspaltung bereits existieren (Elbez-Uzan et al. 2023).

11 Ausblick und TA-Bedarf

Wenn kommerzielle Fusionskraftwerke um die Mitte des Jahrhunderts ans Netz gehen sollen, ist die wissenschaftliche Machbarkeit eines energieerzeugenden Plasmas eine notwendige, aber beileibe keine hinreichende Bedingung. Wie in diesem TAB-Kompakt aufgezeigt wurde, besteht bis zu einem funktionstüchtigen Fusionskraftwerk noch ein hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, u. a. bei kraftwerkstauglichen Materialien, beim Tritiummanagement sowie bei der Integration der Einzelkomponenten in ein Gesamtsystem.

Welche Eigenschaften Fusionskraftwerke haben werden, hängt vom Resultat der Entwicklungsbemühungen in den nächsten Jahren ab. Hier bestehen vielfältige offene Fragen u. a. im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit, Wettbewerbsfähigkeit, Ressourcenbedarf, Emissionen, nukleare Sicherheit, Erzeugung von radioaktiven Abfällen sowie Proliferationsrisiken. Am Ende wird die entscheidende Frage sein, ob Fusionskraftwerke insgesamt gesehen einen gesellschaftlichen Nutzen versprechen.

Wissenschaftliche Arbeiten zu diesem Fragenkomplex sind leider in Deutschland und international dünn gesät. Zwar gab es von 1997 bis 2000 im Rahmen des EURATOM zur Fusionsforschung die Aktivität Socio-Economic Research on Fusion (SERF/sozioökonomische Forschung zu Fusion), die sich mit Energieszenarien, sozioökonomischen Kosten, Umweltwirkungen und auch mit der gesellschaftlichen Akzeptanz der Kernfusion befasst hat. Allerdings war das Budget von SERF mit weniger als 1,5 Mio. ECU recht bescheiden (Ingelstam 1999, S. 423). Darüber hinaus wurden die Arbeiten von der Fusionscommunity selbst koordiniert. Doch wie Ingelstam (1999, S. 424)²⁹ bemerkt: „Bei der Erforschung gesellschaftlicher Auswirkungen wird sich sogar die von spezialisierten Physikern und Technologieexperten dominierte ‚Fusionscommunity‘ für Außenstehende öffnen und akzeptieren müssen, auf eine neue Art und Weise hinterfragt zu werden. Auf den ersten Blick mag es einigen von Ihnen so vorkommen, als würden wir feindselige Haltungen und negative Argumente durch die Hintertür hereinlassen.“

Aus Sicht des TAB (2002) besteht nach wie vor ein großer Bedarf an kontinuierlicher, innovationsbegleitender sozioökonomischer Forschung und Technikfolgenabschätzung bei der Kernfusion. Der hierfür erforderliche unabhängige Sachverstand lässt sich nur mit einer systematischen und langfristig angelegten Förderung aufbauen.

Für die Technikfolgenabschätzung ist die Fusionstechnologie eine große Herausforderung. Ein über mehrere Jahrzehnte reichender Zeithorizont und beträchtliche Wissenslücken und Unsicherheiten erschweren eine verlässliche Bewertung. Dennoch ist es möglich, Kriterien und Gestaltungsanforderungen für die Weiterentwicklung der Fusionstechnologie zu formulieren. Auf dieser Basis kann über Gestaltungsoptionen aus gesellschaftlicher Sicht nachgedacht werden: Durch welche steuernden Eingriffe kann die Entwicklung so beeinflusst werden, dass diese Anforderungen realisiert werden?

So sind bei Technologieentscheidungen oftmals Abwägungen zu treffen und Zielkonflikte zu berücksichtigen. Zur Illustration, welche potenziell hohe gesellschaftliche Relevanz solche Abwägungen haben können, dient das folgende Gedankenexperiment: Es wird ein bestimmtes Material entdeckt, das sich hervorragend für die erste Wand des Plasmagefäßes eignen würde. Allerdings weist es die Eigenschaft auf, dass es unter Einwirkung von Neutronen hochradioaktiv wird. Soll das Material Verwendung finden oder nicht?

Tatsächlich existieren in der Literatur bereits Gedankenspiele, die Entwicklung der Fusionstechnologie zu beschleunigen, indem Umwelt- und andere Bedenken hintangestellt werden (Nuttall 2020, S. 11-10). Diese Herangehensweise birgt jedoch ein erhebliches Risiko: Um gesellschaftliche Akzeptanz für eine Technologie zu erreichen, ist ein sequenzielles Vorgehen, d. h. als erstes die wissenschaftliche Machbarkeit beweisen, dann die technologische Realisierbarkeit zeigen und schließlich am Schluss die Akzeptanz beschaffen, nicht erfolgversprechend. Informations- oder Werbemaßnahmen zum Zwecke der Akzeptanzbeschaffung für umstrittene Technologien haben in der Vergangenheit im Wesentlichen versagt.

Zur Vermeidung von späteren Akzeptanz- und Vertrauenskrisen ist vielmehr ein frühzeitiger intensiver und ergebnisoffener Dialog zwischen Wissenschaft, Interessengruppen und der Öffentlichkeit erforderlich. Dies ist keine einfache Aufgabe, da eine direkte Betroffenheit in der Gesellschaft gegenwärtig nicht festzustellen ist. Das könnte sich allerdings ändern, falls in der nahen Zukunft Entscheidungen etwa zu Standorten von neuen Versuchsanlagen anstehen würden. Aufgrund der sehr hohen Aufmerksamkeit, die die Fusion aktuell in der Öffentlichkeit genießt, sind die Voraussetzungen für einen konstruktiven Dialog gegenwärtig deutlich günstiger als noch vor einigen Jahren.

²⁹ „In research on societal implications even the ›fusion community‹, dominated by specialized physicists and technology experts, will have to open up to outsiders and accept being scrutinized in a new way. Initially, it may seem to some of you that we are letting hostile attitudes and negative arguments in through the back door.“ (Übersetzung TAB)

12 Literatur

- Abdou, M.; Riva, M.; Ying, A.; Day, C.; Loarte, A.; Baylor, L.; Humrickhouse, P.; Fuerst, T.; Cho, S. (2021): Physics and technology considerations for the deuterium–tritium fuel cycle and conditions for tritium fuel self sufficiency. In: *Nuclear Fusion* 61, Art. 013001
- AfBFT (Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung) (2023): Experten: Fusionsforschung muss gestärkt werden. Deutscher Bundestag; https://www.bundestag.de/ausschuesse/a18_bildung_forschung/oeffentliche_anhoerungen/965810-965810 (29.8.2024)
- Amos, J. (2022): Major breakthrough on nuclear fusion energy. BBC News, <https://www.bbc.com/news/science-environment-60312633> (29.8.2024)
- Atzeni, S.; Callahan, D. (2024): Harnessing energy from laser fusion. In: *Physics Today* 77, S. 44–50
- Aviation Week (2023): Skunk Works Halted Nuclear Fusion Effort Before 2021 – Aviation Week Network. <https://aviationweek.com/defense-space/aircraft-propulsion/skunk-works-halted-nuclear-fusion-effort-2021> (4.3.2024)
- Bickerton, R. (1999): History of the approach to ignition. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 357, S. 397–413
- Bigot, B. (2017): ITER: A unique international collaboration to harness the power of the stars. In: *Comptes Rendus Physique* 18, S. 367–371
- BMBF-Expertenkommission (2023): Memorandum Laser Inertial Fusion Energy. https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230522-memorandum-laser-inertial-fusion-energy.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (12.11.2024)
- Bradshaw, A.; Hamacher, T. (2013): Nuclear fusion and the helium supply problem. In: *Fusion Engineering and Design* 88, S. 2694–2697
- Bradshaw, A.; Hamacher, T.; Fischer, U. (2011): Is nuclear fusion a sustainable energy form? In: *Fusion Engineering and Design* 86, S. 2770–2773
- Castelvecchi, D.; Tollefson, J. (2016): US advised to stick with troubled fusion reactor ITER. In: *Nature* 534, S. 16–17
- Chen, X.; Bhattacharya, A.; Sokolov, M.; Clowers, L.; Yamamoto, Y.; Graening, T.; Linton, K.; Katoh, Y.; Rieth, M. (2019): Mechanical properties and microstructure characterization of Eurofer97 steel variants in EUROfusion program. In: *Fusion Engineering and Design* 146, S. 2227–2232
- Chuyanov, V.; Gryaznevich, M. (2017): Modular fusion power plant. In: *Fusion Engineering and Design* 122, S. 238–252
- Cochran, T.; Arkin, W.; Norris, R.; Hoenig, M. (1987): *Nuclear Weapons Databook. U.S. Nuclear Warhead Production v. 2, Appendix C: Tritium Inventory*, Cambridge
- Cook, I.; Miller, R.; Ward, D. (2002): Prospects for economic fusion electricity. In: *Fusion Engineering and Design* 63–64, S. 25–33
- Culham Centre for Fusion Energy (2024): Fusion research facility JET’s final tritium experiments yield new energy record. In: Culham Centre for Fusion Energy. <https://ccfe.ukaea.uk/fusion-research-facility-jets-final-tritium-experiments-yield-new-energy-record/> (11.3.2024)
- Diesendorf, M.; Roser, D.; Washington, H. (2023): Analyzing the Nuclear Weapons Proliferation Risk Posed by a Mature Fusion Technology and Economy. In: *Energies* 16, Art. 1123
- Elbez-Uzan, J.; Williams, L.; Forbes, S.; Dodaro, A.; Stieglitz, R.; Airila, M.; Holden, J.; Rosanvallon, S. (2023): Recommendations for the future regulation of Fusion Power Plants. In: *Nuclear Fusion* 64, Art. 037001
- El-Guebaly, L. (2023): Integral Management Strategy for Fusion Radwaste: Recycling and Clearance, Avoiding Land-Based Disposal. In: *Journal of Fusion Energy* 42, S. 11

- El-Guebaly, L.; Malang, S. (2009): Toward the ultimate goal of tritium self-sufficiency: Technical issues and requirements imposed on ARIES advanced power plants. In: *Fusion Engineering and Design* 84, S. 2072–2083
- Englert, M.; Harrington, A. (2016): Next Generation Nuclear Technologies: New Challenges to the Legal Framework of the IAEA from Intense Neutron Sources. In: Black-Branch, J.; Fleck, D. (Hg.): *Nuclear Non-Proliferation in International Law: Volume II – Verification and Compliance*. Den Haag, S. 187–212
- Entler, S.; Horacek, J.; Dlouhy, T.; Dostal, V. (2018): Approximation of the economy of fusion energy. In: *Energy* 152, S. 489–497
- EUROfusion (2024): Breaking New Ground: JET Tokamak’s Latest Fusion Energy Record Shows Mastery of Fusion Processes. <https://euro-fusion.org/eurofusion-news/dte3record/> (7.3.2024)
- Federici, G. (2023): Testing needs for the development and qualification of a breeding blanket for DEMO. In: *Nuclear Fusion* 63, Art. 125002
- Federici, G.; Biel, W.; Gilbert, M.; Kemp, R.; Taylor, N.; Wenninger, R. (2017): European DEMO design strategy and consequences for materials. In: *Nuclear Fusion* 57, Art. 092002
- Federici, G.; Boccaccini, L.; Cismondi, F.; Gasparotto, M.; Poitevin, Y.; Ricapito, I. (2019): An overview of the EU breeding blanket design strategy as an integral part of the DEMO design effort. In: *Fusion Engineering and Design* 141, S. 30–42
- FIA (Fusion Industry Association) (2024): The Global Fusion Industry in 2024 - Fusion Companies Survey by the Fusion Industry Association. <https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2024/07/2024-annual-global-fusion-industry-report.pdf/> (5.9.2024)
- Finke, E.; Waschkowski, W.; Kneschaurek, P. (1999): Die neue Neutronenquelle FRM-II und ihre Nutzung. In: *Zeitschrift für Medizinische Physik* 9, S. 205–212
- Franceschini, G.; Englert, M.; Liebert, W. (2013): Nuclear Fusion Power for Weapons Purposes: An Exercise in Nuclear Proliferation Forecasting. In: *The Nonproliferation Review* 20, S. 525–544
- Fraunhofer ILT (2022): Historischer Durchbruch in der Fusionsforschung: Laser haben die Kernfusion gezündet! – Fraunhofer ILT. Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, <https://www.ilt.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/2022/12-13-durchbruch-fusionsforschung.html> (21.12.2023)
- Gaganidze, E.; Gillemot, F.; Szenthe, I.; Gorley, M.; Rieth, M.; Diegele, E. (2018): Development of EUROFER97 database and material property handbook. In: *Fusion Engineering and Design* 135, S. 9–14
- GAO (US Government Accountability Office) (2010): Nuclear Weapons: National Nuclear Security Administration Needs to Ensure Continued Availability of Tritium for the Weapons Stockpile. <https://www.gao.gov/products/gao-11-100> (8.12.2023)
- GAO (2023): Fusion Energy. <https://www.gao.gov/assets/gao-23-105813.pdf> (26.3.2024)
- Gentile, C.; Perry, E.; Rule, K.; Williams, M.; Parsells, R.; Viola, M.; Chrzanowski, J. (2003): The First Decommissioning of a Fusion Reactor Fueled by Deuterium-Tritium. Princeton University, Plasma Physics Laboratory, <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc735658/> (11.1.2024)
- Gerstner, E. (2009): Nuclear energy: The hybrid returns. In: *Nature* 460, S. 25–28
- Gibney, E. (2022): Nuclear-fusion reactor smashes energy record. In: *Nature* 602, S. 371–371
- Giegerich, T.; Battes, K.; Schwenger, J.; Day, C. (2019): Development of a viable route for lithium-6 supply of DEMO and future fusion power plants. In: *Fusion Engineering and Design* 149, Art. 111339
- Gilbert, M.; Eade, T.; Bachmann, C.; Fischer, U.; Taylor, N. P. (2017): Activation, decay heat, and waste classification studies of the European DEMO concept. In: *Nuclear Fusion* 57, Art. 046015
- Glugla, M.; Antipenkov, A.; Beloglazov, S.; Caldwell-Nichols, C.; Cristescu, I.; Cristescu, I.; Day, C.; Doerr, L.; Girard, J.-P.; Tada, E. (2007): The ITER tritium systems. In: *Fusion Engineering and Design* 82, S. 472–487

- Gonzalez De Vicente, S.; Smith, N.; El-Guebaly, L.; Ciattaglia, S.; Di Pace, L.; Gilbert, M.; Mandoki, R.; Rosanvallon, S.; Someya, Y.; Tobita, K.; Torcy, D. (2022): Overview on the management of radioactive waste from fusion facilities: ITER, demonstration machines and power plants. In: Nuclear Fusion 62, Art. 085001
- Gorley, M. (2015): Critical Assessment 12: Prospects for reduced activation steel for fusion plant. In: Materials Science and Technology 31, S. 975–980
- Goto, T. (2020): DEMO design activities and helical initiatives in Japan. In: Nuttall, W.; Konishi, S.; Takeda, S.; Webbe-Wood, D. (Hg.): Commercialising fusion energy. Bristol, S. 9-1–9-13
- Griffiths, T.; Pearson, R.; Bluck, M.; Takeda, S. (2022): The commercialisation of fusion for the energy market: a review of socio-economic studies. In: Progress in Energy 4, Art. 042008
- GRS (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH) (2013): Untersuchung der Sicherheit von Kernfusionskraftwerken hinsichtlich nuklearer Stör- und Unfälle. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3611_r_01353_kernkraftwerk_stoerfaelle_bf.pdf (12.11.2024)
- GRS; KIT (Karlsruher Institut für Technologie) (2021): Study on the Applicability of the Regulatory Framework for Nuclear Facilities to Fusion Facilities. Towards a specific regulatory framework for fusion facilities. European Commission (Hg.), Brüssel
- Gryaznevich, M.; Chuyanov, V.; Kingham, D.; Sykes, A.; Tokamak Energy Ltd. (2015): Advancing Fusion by Innovations: Smaller, Quicker, Cheaper. In: Journal of Physics: Conference Series 591, Art. 012005
- Handley, M.; Slesinski, D.; Hsu, S. (2021): Potential Early Markets for Fusion Energy. In: Journal of Fusion Energy 40(2), Art. 18
- Helmholtz Task Force „Laserbasierte Fusionsforschung“ (2023): The Fusion Energy Options – Discussion Paper. https://www.helmholtz.de/assets/helmholtz_gemeinschaft/Standpunkte/Discussion_Paper_AG_Laser.pdf (27.11.2023)
- Hengstler, J.; Russ, M.; Stoffregen, A.; Hendrich, A.; Held, M.; Briem, A.-K. (2021): Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen. Umweltbundesamt (Hg.), Climate Change 35, Dessau-Roßlau
- Hernández, F.; Pereslavitsev, P.; Zhou, G.; Kang, Q.; D’Amico, S.; Neuberger, H.; Boccaccini, L.; Kiss, B.; Nádas, G.; Maqueda, L.; Cristescu, I. et al. (2020): Consolidated design of the HCPB Breeding Blanket for the pre-Conceptual Design Phase of the EU DEMO and harmonization with the ITER HCPB TBM program. In: Fusion Engineering and Design 157, Art. 111614
- Hesch, K.; Stieglitz, R. (2023): ITER and DEMO – Technology Challenges on the Way to Fusion Power. In: Atw 68(5), S. 37–44
- Hirsch, R. (2021): Electric Power Amplification in Fusion Power Plants. In: European Journal of Energy Research 1, S. 1–3
- Hossenfelder, S. (2021): How close is nuclear fusion power? <https://www.youtube.com/watch?v=LJ4W1g-6JiY> (29.8.2024)
- IAEA (International Atomic Energy Agency) (2014): Report of the consultancy meeting on „Non-Proliferation Challenges in Connection with Magnetic Fusion Power Plants“ https://www.prif.org/fileadmin/HSFK/hsfk_downloads/Consultancy_Fusion_Non-Proliferation_Report_Final.pdf (29.8.2024)
- IAEA (o. J.): FusDIS. <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal> (12.11.2024)
- IFMIF-DONES España (o. J.): What is IFMIF-DONES? <https://ifmif-dones.es/dones-programme/> (29.8.2024)
- Ingelstam, L. (1999): Socio-economic aspects of fusion: research in the European context. In: Fusion Engineering and Design 46, S. 423–431

- IRSN (2017): Nuclear Fusion Reactors. https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/larecherche/publications-documentation/collection-ouvrages-irsn/ITER-VA_web_non_imprimable.pdf (12.11.2024)
- Jassby, D. (2018): Voodoo Fusion Energy. <https://vixra.org/pdf/1812.0382v1.pdf> (12.11.2024)
- Kalinowski, M. (1993): Uncertainty and range of alternatives in estimating tritium emissions from proposed fusion power reactors and their radiological impact. In: *Journal of Fusion Energy* 12, S. 157–161
- Kalinowski, M. (2004): *International Control of Tritium for Nuclear Nonproliferation and Disarmament*. London u. a. O.
- Kalinowski, M.; Colschen, L. (1995): International control of tritium to prevent horizontal proliferation and to foster nuclear disarmament. In: *Science & Global Security* 5, S. 131–203
- Kaslow, J.; Brown, M.; Hirsch, R.; Izzo, R.; McCann, J.; McCloud, D.; Muston, B.; Peterson, A.; Rosen, S.; Schneider, T.; Skrgic, P.; Snow, B. (1994): Criteria for practical fusion power systems: Report from the EPRI fusion panel. In: *Journal of Fusion Energy* 13, S. 181–183
- Klein, J. (2020): SRNL Tritium Science and Technology for Fusion Energy. https://infuse.ornl.gov/wp-content/uploads/2020/12/INFUSE_Workshop2020_SRNL.pdf (12.1.2024)
- Klinger, T.; Andreeva, T.; Bozhenkov, S.; Brandt, C.; Burhenn, R.; Buttenschön, B.; Fuchert, G.; Geiger, B.; Grulke, O.; Laqua, H.; Pablant, N. et al. (2019): Overview of first Wendelstein 7-X high-performance operation. In: *Nuclear Fusion* 59, Art. 112004
- Konishi, S.; Kasada, R.; Okino, F. (2017): Myth of initial loading tritium for DEMO—Modelling of fuel system and operation scenario. In: *Fusion Engineering and Design* 121, S. 111–116
- Konishi, S.; Nam, H.; Takeda, S. (2020): Fusion energy and carbon management. In: Nuttall, W.; Konishi, S.; Takeda, S.; Webbe-Wood, D. (Hg.): *Commercialising fusion energy*. Bristol, S. 12-1–12-20
- Kovari, M.; Coleman, M.; Cristescu, I.; Smith, R. (2018): Tritium resources available for fusion reactors. In: *Nuclear Fusion* 58, Art. 026010
- Kramer, D. (2014): Livermore ends LIFE. In: *Physics Today* 67, S. 26–27
- Lechón, Y. (2005): The economic viability of fusion power. In: *Fusion Engineering and Design*, 75, S. 1221–1227
- Lehtonen, M. (2021): NEA Framing Nuclear Megaproject „Pathologies“: Vices of the Modern Western Society? In: *Nuclear Technology* 207, S. 1329–1350
- Lockheed Martin Aeronautics Company (2014): Lockheed Martin Pursuing Compact Nuclear Fusion Reactor Concept. <https://news.lockheedmartin.com/2014-10-15-Lockheed-Martin-Pursuing-Compact-Nuclear-Fusion-Reactor-Concept> (12.11.2024)
- Lukacs, M.; Williams, L. (2020): Nuclear safety issues for fusion power plants. In: *Fusion Engineering and Design* 150, Art. 111377
- Makhijani, A.; Ramana, M. (2021): Can small modular reactors help mitigate climate change? In: *Bulletin of the Atomic Scientists* 77, S. 207–214
- Malhotra, A.; Schmidt, T. (2020): Accelerating Low-Carbon Innovation. In: *Joule* 4, S. 2259–2267
- Mateus, R.; Porosnicu, C.; Dias, M.; Vitelaru, C.; Carvalho, P.; Lungu, C.; Alves, E. (2024): Stability of beryllium-tungsten coatings under annealing up to 1273 K. In: *Nuclear Materials and Energy* 38, Art. 101571
- Meschini, S.; Laviano, F.; Ledda, F.; Pettinari, D.; Testoni, R.; Torsello, D.; Panella, B. (2023): Review of commercial nuclear fusion projects. In: *Frontiers in Energy Research* 11, Art. 1157394
- MIT (Massachusetts Institute of Technology) (2018): The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World. <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2018/09/The-Future-of-Nuclear-Energy-in-a-Carbon-Constrained-World.pdf> (12.11.2024)

- Mori, Y. (2020): Laser fusion CANDY GPI/Hamamatsu. In: Nuttall, W.; Konishi, S.; Takeda, S.; Webbe-Wood, D. (Hg.): Commercialising fusion energy. How small businesses are transforming big science. Bristol, S. 6-1–6-12
- MPG (Max-Planck-Gesellschaft) (2023): Brennpunkt der Kernfusion. <https://www.mpg.de/19734973/brennpunkte-der-kernfusion> (29.8.2024)
- Najmabadi, F. (1999): Prospects for attractive fusion power systems. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 357, S. 625–638
- Ni, M.; Wang, Y.; Yuan, B.; Jiang, J.; Wu, Y. (2013): Tritium supply assessment for ITER and DEMONstration power plant. In: Fusion Engineering and Design 88, S. 2422–2426
- Nicholas, T.; Davis, T.; Federici, F.; Leland, J.; Patel, B.; Vincent, C.; Ward, S. (2021): Re-examining the role of nuclear fusion in a renewables-based energy mix. In: Energy Policy 149, Art. 112043
- Nie, B.; Fang, S.; Jiang, M.; Wang, L.; Ni, M.; Zheng, J.; Yang, Z.; Li, F. (2021): Anthropogenic tritium: Inventory, discharge, environmental behaviour and health effects. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 135, Art. 110188
- Nuttall, W. (2020): Commercial opportunities for nuclear fusion. In: Nuttall, W.; Konishi, S.; Takeda, S.; Webbe-Wood, D. (Hg.): Commercialising fusion energy. Bristol, S. 11-1–11-21
- Odette, R.; Zinkle, S. (Hg.) (2019): Structural Alloys for Nuclear Energy Applications. Amsterdam u. a. O.
- Pearson, R. (2020): Fusion innovation: understanding the engineering challenges to commercial fusion. In: Nuttall, W.; Konishi, S.; Takeda, S.; Webbe-Wood, D. (Hg.): Commercialising fusion energy. Bristol, S. 10-1–10-36
- Pearson, R.; Antoniazzi, A.; Nuttall, W. (2018): Tritium supply and use: a key issue for the development of nuclear fusion energy. In: Fusion Engineering and Design 136, S. 1140–1148
- Peek, M.; Diels, R. (2016): Ein Strommarktdesign zur kostengünstigen Erreichung der langfristigen Klimaschutzziele. Umweltbundesamt (Hg.), Climate Change 05, Dessau-Roßlau
- Perrault, D. (2019): Nuclear safety aspects on the road towards fusion energy. In: Fusion Engineering and Design 146, S. 130–134
- Perry, E.; Chrzanowski, J.; Gentile, C.; Parsells, R.; Rule, K.; Strykowski, R.; Viola, M. (2003): Decommissioning of the tokamak fusion test reactor. In: 20th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering. IEEE, S. 256–259
- Reichert, S. (2020): Inside ITER. In: Nature Physics 16, S. 895–897
- Riordon, J. (2022): A nuclear fusion experiment finally made more energy than it used. <https://www.sciencenews.org/article/nuclear-fusion-breakthrough-energy> (11.3.2024)
- Sawan, M.; Abdou, M. (2006): Physics and technology conditions for attaining tritium self-sufficiency for the DT fuel cycle. In: Fusion Engineering and Design 81, S. 1131–1144
- Schmidt, T. (2023): Schriftliche Stellungnahme, Zürich
- Sheffield, J.; Milora, S. (2016): Generic Magnetic Fusion Reactor Revisited. In: Fusion Science and Technology 70, S. 14–35
- Smolentsev, S.; Rognlien, T.; Tillack, M.; Waganer, L.; Kessel, C. (2019): Integrated Liquid Metal Flowing First Wall and Open-Surface Divertor for Fusion Nuclear Science Facility: Concept, Design, and Analysis. In: Fusion Science and Technology 75, S. 939–958
- Sparkes, M. (2024): UK nuclear fusion reactor sets new world record for energy output. In: New Scientist. <https://www.newscientist.com/article/2415909-uk-nuclear-fusion-reactor-sets-new-world-record-for-energy-output/> (11.3.2024)
- Stork, D. (2009): DEMO and the Road to Fusion Power. https://fire.pppl.gov/eu_demo_Stork_FZK%20.pdf (26.3.2024)
- Strategy& (2023): Fusion Energy – The key to the future energy architecture. <https://www.strategyand.pwc.com/de/en/industries/energy-utilities/fusion-energy.html> (18.9.2023)

- TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2002): Kernfusion. (Grunwald, A.; Grünwald, R.; Oertel, D.; Paschen, H.) TAB-Arbeitsbericht Nr. 75, Berlin
- TAB (2012): Regenerative Energieträger zur Sicherung der Grundlast in der Stromversorgung (Grünwald, R.; Ragwitz, M.; Sensfuß, F.; Winkler, J.) TAB-Arbeitsbericht Nr. 147, Berlin
- TAB (2017): Lastfolgefähigkeit deutscher Kernkraftwerke. (Grünwald, R.; Caviezel, C.) TAB-Hintergrundpapier Nr. 21, Berlin
- Takeda, S.; Gonzalez de Vicente, S. (2020): Considerations for commercialization strategies for fusion energy. In: Nuttall, W. J.; Konishi, S.; Takeda, S.; Webbe-Wood, D. (Hg.): Commercialising fusion energy. Bristol, S. 3-1–3-13
- Takeda, S.; Konishi, S.; Yamamoto, Y.; Kasada, R.; Sakurai, S. (2015): Dynamic Simulation-Based Case Study of Fusion on Small-Scale Electrical Grids. In: Fusion Science and Technology 68, S. 341–345
- Takeda, S.; Sakurai, S.; Konishi, S. (2020): Economic Performance of Fusion Power Plant on Deregulated Electricity Markets. In: Journal of Fusion Energy 39, S. 31–39
- Taylor, N.; Ciattaglia, S.; Coombs, D.; Jin, X. Z.; Johnston, J.; Liger, K.; Mazzini, G.; Mora, J.; Pinna, T.; Porfiri, M.; Urbonavicius, E.; Vale, R.; Widdowson, A. (2019): Safety and environment studies for a European DEMO design concept. In: Fusion Engineering and Design 146, S. 111–114
- Thomas, S.; Ramana, M. (2022): A hopeless pursuit? National efforts to promote small modular nuclear reactors and revive nuclear power. In: WIREs Energy and Environment 11, Art. e429
- Tollefson, J. (2023): US nuclear-fusion lab enters new era: achieving ›ignition‹ over and over. In: Nature 625(7993), S. 11–12
- Torsello, D.; Gambino, D.; Gozzelino, L.; Trotta, A.; Laviano, F. (2022): Expected radiation environment and damage for YBCO tapes in compact fusion reactors. In: Superconductor Science and Technology 36, Art. 014003
- Tynan, G.; Abdulla, A. (2020): How might controlled fusion fit into the emerging low-carbon energy system of the mid-twenty-first century? In: Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 378, Art. 20200009
- USGS (United States Geological Service) (2024): Mineral Commodity Summaries. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024.pdf> (29.8.2024)
- Ward, D.; Cook, I.; Lechon, Y.; Saez, R. (2005): The economic viability of fusion power. In: Fusion Engineering and Design 75–79, S. 1221–1227
- WD (Wissenschaftliche Dienste) (2023): Rechtliche Rahmenbedingungen für die Errichtung und den Betrieb von Fusionskraftwerken zur kommerziellen Energiegewinnung. Deutscher Bundestag, WD8 – 3000 – 004/23, Berlin
- Webbe-Wood, D. (2020): Funding and financing commercial fusion power plants. In: Nuttall, W.; Konishi, S.; Takeda, S.; Webbe-Wood, D. (Hg.): Commercialising fusion energy. Bristol, S. 4-1–4-8
- Webbe-Wood, D.; Nuttall, W. (2023): Calculations of net present value for a small modular fusion power plant. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Energy 176, S. 187–196
- Westra, M.-T.; Kuyvenhoven, S. (2007): Energie, die deine Welt bewegt. Rijnhuizen
- Wikipedia (o.J.a): Kraftwerks- und Meerwasserentsalzungsanlage Dschabal Ali. https://de.wikipedia.org/wiki/Kraftwerks-_und_Meerwasserentsalzungsanlage_Dschabal_Ali (29.8.2024)
- Wikipedia (o.J.b): Lawson criterion. https://en.wikipedia.org/wiki/Lawson_criterion (29.8.2024)
- Wikipedia (o.J.c): Minamata-Übereinkommen. <https://de.wikipedia.org/wiki/Minamata-%C3%9Cbereinkommen> (29.8.2024)
- Wikipedia (o.J.d): Nuclear fusion–fission hybrid. https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fusion%E2%80%93fission_hybrid (29.8.2024)
- Wikipedia (o.J.e): PUREX-Prozess. <https://de.wikipedia.org/wiki/PUREX-Prozess> (29.8.2024)

- Wikipedia (o.J.f): Technetium-99m. <https://en.wikipedia.org/wiki/Technetium-99m> (29.8.2024)
- Wikipedia (o.J.g): Zap Energy. https://en.wikipedia.org/wiki/Zap_Energy (29.8.2024)
- Willms, S. (2008): Tritium Supply From non-Fusion Sources. https://bpb-us-w2.wpmucdn.com/research.seas.ucla.edu/dist/d/39/files/2019/08/Willms-Tritium_Supply_Considerations.pdf (31.1.2024)
- Wilson, H.; Chapman, I.; Denton, T.; Morris, W.; Patel, B.; Voss, G.; Waldon, C.; STEP Team (2020): STEP—on the pathway to fusion commercialization. In: Nuttall, W.; Konishi, S.; Takeda, S.; Webbe-Wood, D. (Hg.): Commercialising fusion energy. Bristol, S. 8-1–8-16
- Wimmers, A.; Böse, F.; Kemfert, C.; Steigerwald, B.; von Hirschhausen, C.; Weibezahn, J. (2023): DIW Berlin: Ausbau von Kernkraftwerken entbehrt technischer und ökonomischer Grundlagen. DIW Berlin. https://www.diw.de/de/diw_01.c.867887.de/publikationen/wochenberichte/2023_10_1/ausbau_von_kernkraftwerken_entbehrt_technischer_und_oekonomischer_grundlagen.html#box1-collapsible (19.2.2024)
- Windridge, M. (2020): Tokamak Energy. In: Nuttall, W.; Konishi, S.; Takeda, S.; Webbe-Wood, D. (Hg.): Commercialising fusion energy. Bristol, S. 5-1–5-13
- Woodruff Scientific Inc. (2020): Revisit of the 2017 Costing for Four ARPA-E ALPHA Concepts. https://www.arpa-e.energy.gov/sites/default/files/2021-03/Final%20Scientific-Technical%20Report_%20Costing%20%286%29.pdf (6.12.2023)
- World Nuclear Association (2022): Economics of Nuclear Power. <https://www.world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx> (26.3.2024)
- Yonas, G. (1998): Kernfusion mit dem Pinch-Effekt. In: Spektrum.de. <https://www.spektrum.de/magazin/kernfusion-mit-dem-pinch-effekt/824843> (4.3.2024)
- Zucchetti, M.; Candido, L.; Khripunov, V.; Kolbasov, B.; Testoni, R. (2018): Fusion power plants, fission and conventional power plants. Radioactivity, radiotoxicity, radioactive waste. In: Fusion Engineering and Design 136, S. 1529–1533
- Zuvela, K.; Adlington, I.; Aljunied, S.; Edwards, J. (2014): Determining the best approach to commercial fusion power. In: PAM Review Energy Science & Technology 1, S. 3–19

13 Anhang**13.1 Interviewpartner**

| Name | Organisation |
|--------------------------------------|--|
| Val Aslanyan | Betreiber des Youtube-Kanals „improbable matter“ |
| Michael Dittmar | ehemals ETH Zürich |
| Dr. Matthias Englert | Senior Researcher, Öko-Institut |
| Christoph Pistner | Senior Researcher, Öko-Institut |
| Prof. Dr. Mohamed Abdou | Distinguished Professor Emeritus Mechanical and Aerospace Engineering, Director of Fusion Science and Technology Center, University of California, Los Angeles |
| Prof. Dr. William Nuttall | Professor of Energy Faculty of Science, Technology, Engineering & Mathematics, School of Engineering & Innovation |
| Prof. Dr. Tobias Schmidt | Head of Energy and Technology Policy Group, ETH Zürich |
| Dr. Klaus Hesch | Programmsprecher, Head of EUROfusion Research Unit, Karlsruher Institut für Technologie |
| Prof. Dr. Thomas Klinger | Professor Leiter des Bereichs Stellarator-Dynamik und -Transport, Max-Planck-Gesellschaft IPP |
| Prof. Dr. Christian von Hirschhausen | Fachgebietsleiter Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik TU Berlin/Forschungsdirektor DIW Berlin |
| Tomas Griffiths | PhD Candidate Imperial College London |

Die Interviews wurden von November 2023 bis Februar 2024 geführt.

13.2 Abbildungen

| | Seite |
|---|-------|
| Abbildung 2.1 Zwei Betrachtungsebenen beim Energieverstärkungsfaktor Q..... | 12 |
| Abbildung 2.2 In JET erzeugte Fusionsenergie 1997 bis heute | 14 |
| Abbildung 2.3 In sich gedrehtes Spulensystem des Stellarators Wendelstein 7-X..... | 16 |
| Abbildung 2.4 Erfolgreiche Fusionsexperimente der NIF | 16 |
| Abbildung 2.5 Energiebilanz der weltweit ersten Zündung an der NIF..... | 17 |
| Abbildung 2.6 Roadmap für die Entwicklung der Kernfusion nach den Vorstellungen von 1993 | 18 |
| Abbildung 3.1 Wärmebelastung und Zeitdauer ihres Einwirkens für einige nukleare und andere extreme Bedingungen..... | 20 |
| Abbildung 3.2 Konzept eines Blankets für DEMO..... | 25 |
| Abbildung 3.3 Vereinfachtes Blockdiagramm der BOP-Systeme von DEMO | 27 |
| Abbildung 4.1 Roadmap von Tokamak Energy für die Entwicklung kommerzieller Fusionsmodule | 31 |

13.3 Tabelle

| | Seite |
|---|-------|
| Tabelle 4.1 Überblick über deutsche Start-ups | 31 |

13.4 Kästen

| | |
|---|----|
| Kasten 2.1 Wenn über Kernfusion berichtet wird, | 13 |
| Kasten 2.2 Schritte auf dem Weg zu einem kommerziellen Fusionskraftwerk..... | 14 |
| Kasten 2.3 Plasmadisruptionen | 15 |
| Kasten 2.4 National Ignition Facility | 17 |
| Kasten 2.5 Zum Umgang mit Roadmaps und Kosten | 18 |
| Kasten 3.1 Thermische Wechselbelastung von Materialien – Vergleich mit Kern(spaltungs)kraftwerken..... | 21 |
| Kasten 3.2 IFMIF-DONES | 22 |
| Kasten 3.3 Mengenvergleich: Tritium für militärische Zwecke | 24 |
| Kasten 3.4 Achillesferse Verdopplungszeit | 26 |
| Kasten 3.5 Beispiel für Störfälle, die mit robotischen Systemen zu meistern wären | 28 |
| Kasten 5.1 Kritik an Berechnungen von Stromerzeugungskosten | 32 |
| Kasten 5.2 Thema Lernrate | 35 |
| Kasten 8.1 Störfälle bei Magnetspulen | 46 |
| Kasten 8.2 Abfuhr von Zerfallswärme | 46 |
| Kasten 9.1 Einbeziehung der Expertise der Fusionsforschenden..... | 50 |

