

Bitte Kernfusion nur auf der Sonne!

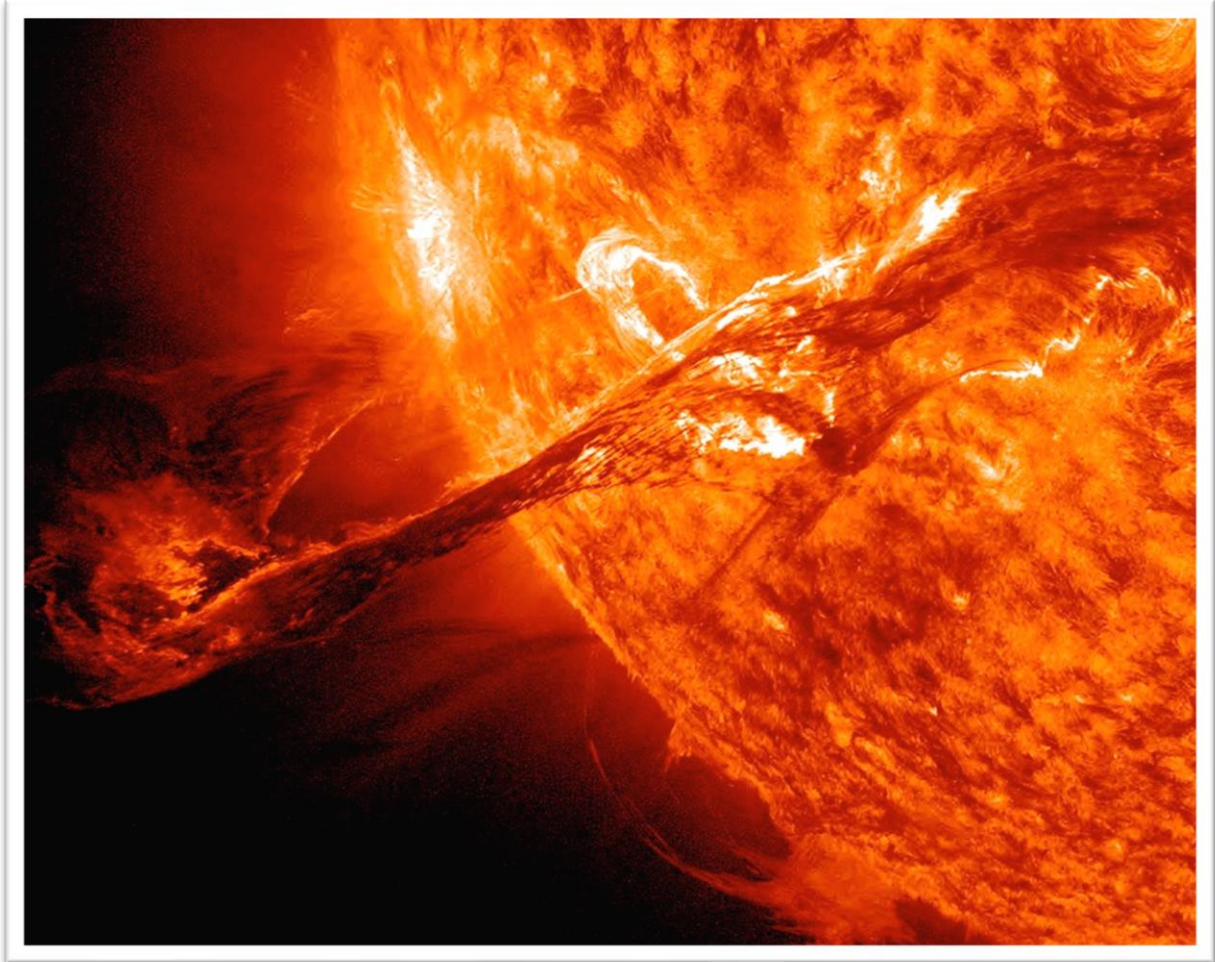


Abbildung 1: NASA Goddard Space Flight Center MD, USA: On August 31, 2012 a long filament of solar material that had been hovering in the sun's atmosphere, the corona, erupted out into space at 4:36 p.m. EDT. (Wikimedia Commons Lizenz CC BY 2.0)

Sammlung von Argumenten gegen die Kernfusion auf der Erde.

Autor

Stephan Warseck

Mitautoren

Michael Dittmar, Hauke Benner, Udo Holländer

Dieses Dokument wurde nach bestem Wissen transparent unter Angabe der genutzten Quellen zusammengestellt. Jedoch handelt es sich nicht um eine qualitätsgesicherte Studie. Falls Sie mithelfen wollen, diese Sammlung zu verbessern, nehmen wir Ihre Kritiken, Fehlermeldungen und Verbesserungsvorschläge gerne entgegen unter kernfusion@ms-wo.de

Gestaltung

Stephan Warseck

Entsprechend des Urheberrechtsgesetz §51 (Zitatrecht für wissenschaftliche Arbeiten) wurden die Abbildungen mit Quellen belegt.

Januar 2025

Inhalt

Inhalt	2
1. Einleitung	4
<i>Warum noch eine Bewertung der Kernfusion?</i>	4
<i>Wie ist die FAQ-Sammlung aufgebaut?</i>	5
2. Zusammenfassung	6
3. Gesellschaftliche Aspekte	8
<i>Nachhaltigkeit</i>	8
Könnten Fusionskraftwerke ein ewiges Wachstum ermöglichen?	8
Wie ist die Nachhaltigkeit von Fusionskraftwerken einzuschätzen?	8
<i>Forschungspolitik</i>	8
Warum werden so viele Fusions-Start-Ups derzeit gegründet? Ist eine kontrollierte Kernfusion so einfach zu realisieren?	8
Warum brauchen wir keine Fusionsforschung?	9
Führen die derzeitigen Ausgaben für die Fusionsforschung zu Defiziten an anderer Stelle?	9
Wieso kann man DEMO planen, ohne ITER zum Laufen zu bringen?	10
Müssten die in der Fusionsforschung Tätigen bei einem Wegfall der Fusionsforschung fürchten, arbeitslos zu werden?	10
<i>Politik</i>	11
Wie positioniert sich die Bundesregierung zur Kernfusion?	11
Welche Stellungen beziehen die Parteien zur Kernfusion?	11
<i>Störfallszenarien</i>	12
Wie angreifbar werden Fusionskraftwerke im Friedens- und im Krisenfall sein?	12
<i>Rechtlicher Rahmen</i>	12
Braucht es für die Kernfusion ein eigenes rechtliches Regelwerk oder reicht das Atomgesetz?	12
4. Energietransformation	13
<i>Klimawandel</i>	13
Würden Fusionskraftwerke tatsächlich etwas zur Bewältigung des Klimawandels beitragen können?	13
<i>Energiebedarf</i>	13
Wie realistisch ist der prognostizierte Energiehunger der Menschheit in der Zukunft?	13
Warum orientiert sich die Elite der Gesellschaft immer noch an Wachstumskonzepten?	14
Was versteht man unter dem Begriff "physikalische Grenzen des Wachstums" in Bezug auf den zukünftigen Energiebedarf der Erde?	14
<i>Bedarfsgerechte Versorgung</i>	14
Könnte man Fusionskraftwerke leicht, entsprechend der aktuellen Stromnachfrage im Stromnetz, regeln?	14
Könnte man Fusionskraftwerke leicht in vorhandene Stromnetze integrieren?	15
Könnte man Fusionskraftwerke für die Trinkwassergewinnung aus Meerwasser in den südlichen Problemzonen einsetzen?	15
5. Militärische Aspekte	15
Warum ist das Militär an der Fusionsforschung interessiert?	15
Warum ist die internationale Atomenergiebehörde (IAEA) so oberflächlich bei der Beantwortung der Frage: "Can fusion reactors be used to produce weapons?"	16
6. Technische Aspekte	17
<i>Durchbrüche und Roadmaps</i>	17
Wie sind die "Durchbrüche" bei der Kernfusionsforschung zu beurteilen?	17
Welche Unwägbarkeiten enthält die European Fusion Roadmap?	18
<i>Grundstoffe für die Kernfusion</i>	18
Stehen Deuterium und Tritium tatsächlich unbegrenzt zur Verfügung?	18
Welche für die Fusionsreaktoren benötigten Materialien könnten neben Tritium Mangelware sein?	19
<i>Tritium-Selbstversorgung</i>	20
Warum ist das "Tritium-Breeding-Verhältnis" nicht die entscheidende Größe für die Tritium-Selbstversorgung in einem Fusionskraftwerk?	20
Wird man mit ITER eine Tritium-Selbstversorgung nachweisen können?	21
<i>Anforderungen an die Materialien</i>	22
Welche Materialien eignen sich zum Bau von Fusionskraftwerken?	22
Kann man die Auswirkungen der Neutronen auf die im Fusionsreaktor verwendeten Materialien schon genügend gut voraussagen?	22
Gibt es Anforderungen an die Reinheit des Stahls, der in Fusionskraftwerken eingesetzt werden soll?	23

Gibt es Anforderungen an die Reinheit des Berylliums, das in Fusionskraftwerken eingesetzt werden soll?	24
<i>Wartungszyklen</i>	25
Stimmt es, dass Fusionskraftwerke in regelmäßigen Abständen Wartungszyklen brauchen und dann keinen Strom produzieren?	25
Stimmt es, dass man in den Wartungszyklen hoch radioaktive Teile erneuern muss und dies nur mit Automaten machbar ist?	25
7. Umwelt Aspekte	26
<i>Nachhaltigkeit</i>	26
Gibt es eine umfassende Nachhaltigkeitsanalyse für die geplanten Fusionskraftwerke?	26
Wie beeinflussen Energien aus "nicht erneuerbaren Quellen" die Oberflächentemperatur der Erde?	27
<i>Kühlung und Wasserverbrauch</i>	27
Warum brauchen Fusionskraftwerke so viel Wasser im Betrieb?	27
Was passiert mit der vielen Abwärme aus den geplanten Fusionskraftwerken?	27
<i>Emissionen/ Strahlenschutz</i>	28
Welche radioaktiven Emissionen werden über Abluft und Abwasser in dem Regelbetrieb von Fusionskraftwerken erwartet?	28
Gibt es Verfahren zur Reinigung der Abluft bzw. des Abwassers, um die Gehalte an Tritium zu senken?	30
Welche Strahlenschutzvorkehrungen müssen zum Schutz der Beschäftigten getroffen werden?	31
<i>Tritium</i>	31
Welche Gefahren sind beim Transport von Tritium zu bedenken?	31
Ist die Radiotoxizität von Tritium hinreichend bekannt?	31
Warum unterscheiden sich die national festgesetzten Trinkwassergrenzwerte für Tritium um Zehnerpotenzen?	33
Kann man Tritium mit einem Personendosimeter erfassen?	33
Wie bestimmt man Tritium in Umweltkompartimenten?	33
<i>Beryllium</i>	33
Ist Beryllium harmlos?	33
<i>Metallschmelzen</i>	34
Stimmt es, dass man u.a. auch Metallschmelzen zur Kühlung vorgesehen hat?	34
<i>Radioaktiver Abfall</i>	34
Auf welchem Konzept basiert der Umgang mit dem radioaktiven Abfall?	34
Was sind markante Schwachstellen des 10 µSv Konzeptes?	35
Mit welchen Mengen an radioaktiven Abfall muss man bei der Kernfusionsreaktoren rechnen?	36
Was ist bei der Wartung bzw. beim Rückbau bezüglich des Tritiums zu beachten?	36
Kann man alle relevanten Isotope im radioaktiven Abfall von Fusionsreaktoren einfach messen?	36
Ist bei Fusionskraftwerken eine mittelfristige Lagerung von radioaktivem Abfall notwendig?	37
Stimmt es, dass wir mit der Kernfusion kein Endlager für radioaktive Abfälle brauchen?	37
Gibt es Erfahrungen zur Zwischen- und Endlagerung von aktiviertem Beryllium?	38
Alles klar mit den radioaktiven Abfällen aus Fusionsreaktoren?	39
8. Wirtschaftliche Aspekte	40
Welche Aussagen gibt es zur Wirtschaftlichkeit eines Kernfusionskraftwerks?	40
Mit welchen Bauzeiten, Betriebs- und Wartungszeiten, sowie Zeiten zum Abbau von Fusionskraftwerken rechnet man?	41
Sollte der Bau von Fusionskraftwerken tatsächlich möglich sein, welcher Wirkungsgrad ist bestenfalls zu erreichen?	41
Gibt es Schätzungen zur Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Wartbarkeit und Inspektionsfähigkeit von Fusionsreaktoren?	42
Gibt es Modelle zur möglichen Integration von Grundlastkraftwerken in ein Stromnetz nach 2045?	43
Wie hoch sind derzeit die Stromgestehungskosten in Deutschland?	44
Wie ist der Trend der Stromkosten zu bewerten?	44
9. Wissenschaftskritik	45
Wird die Forschungspolitik in Deutschland bezüglich der Kernfusion von Lobbyisten beeinflusst?	45
Ist die sogenannte Politikberatung bezüglich der Fusionsforschung durch das Akademien Projekt „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS) frei von Interessenskonflikten?	45
Gibt es die "Wissenschaftsfreiheit" in Großforschungsanlagen?	46
Gibt es „Wissenschafts- bzw. „Akademische Freiheit“ in den Naturwissenschaften?	46
Ist die Annäherung der Naturforscher an die Natur, ist ihr Verständnis von Naturphänomenen wirklich wertneutral und unschuldig?	47
10. Stichwortverzeichnis	48
11. Literaturverzeichnis	50

1. Einleitung

Warum noch eine Bewertung der Kernfusion?

Seit dem Sommer 2024 sind etliche umfangreiche Studien zum Thema Kernfusion in Deutschland erschienen. Zu nennen sind dabei folgende Veröffentlichungen in der Reihenfolge des Erscheinens:

- Wurbs S., Dehlwes S., Lübke A. u.a. (ESYS): Impulsbeitrag: Kernfusion als Baustein einer klimaneutralen Energieversorgung? Chancen, Herausforderungen, Zeithorizonte; August 2024 [1]
- Wissenschaftlicher Klimabeirat Hessen: Stellungnahme - Welchen Beitrag kann lasergetriebene Kernfusion zur Erreichung der hessischen Klimaziele leisten? November 2024 [2] aufbauend auf: Englert M., Kopp A. (Öko-Institut e.V.): Übersichtsstudie Kernfusion für den Klimabeirat Hessen; 15.11.2024 [3]
- Grünwald R. (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag TAB): Auf dem Weg zu einem möglichen Kernfusionskraftwerk - Wissenslücken und Forschungsbedarfe aus Sicht der Technikfolgenabschätzung; Dezember 2024 [4]

Der ESYS Impulsbeitrag war der Anlass, dass sich ab Ende August 2024 Bürger zusammgefunden haben, um ehrenamtlich eine FAQ-Sammlung mit Argumenten gegen die Kernfusion zu erschaffen. Die Autoren dieser FAQ-Sammlung schätzten ein, dass es sich bei dem ESYS Impulsbeitrag insbesondere bei den Empfehlungen für Politiker um einen stark interessen geleiteten Beitrag handelte (siehe Seite 45).

Die beiden Beiträge aus Hessen thematisieren durch den Bezug auf den dortigen Koalitionsvertrag nur die lasergetriebene Kernfusion, die in Deutschland noch nicht beforscht wird.

Mit Genugtuung haben die Autoren dieser FAQ-Sammlung dann die umfangreiche Studie vom TAB vom letzten Monat aufgenommen. Hier wird erstmalig die Tritium-Selbstversorgung mit der Einschätzung „Die Frage, ob eine Selbstversorgung von Kraftwerken mit Tritium technisch überhaupt möglich ist, sollte prioritär beantwortet werden.“ in den Mittelpunkt gerückt.

Doch es gab schon sehr lange Zeit Kritiker, die genau solche kritischen Fragestellungen thematisierten. So wurden im Auftrag der Bundestagsfraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN zwei Gutachten zu „Status und Aussichten des ITER-Plasmaphysik-Experiments“ Michael Dittmar erstellt [5], [6], [7]. Darauf aufbauend wurde der Antrag der Bundestagsfraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN „Fusionsreaktor ITER nicht als Klimaschutzmaßnahme ausweisen“ formuliert [8].

Michael Dittmar fasste das Problem 2020 in einem taz Artikel so zusammen: **„Alles, was bisher passiert ist, zeigt, dass kommerzielle Energieproduktion aus Fusion niemals Realität wird....Es wird Zeit, dass die Fusionsforscher das endlich zugeben.“** [9]. Aber die Realität erinnert ihn an „Des Kaisers neue Kleider“, das Märchen von Hans Christian Andersen. „Wenn alle anderen behaupten, etwas zu sehen, traut sich keiner zu sagen, dass er nackt ist“ [9].

Noch schärfer ist das Urteil von L.J. Reinders in dem Buch „The Fairy Tale of Nuclear Fusion“ aus dem Jahr 2021 **„Die Geschichte der Kernfusion zeigt, dass die menschliche Fähigkeit zur Selbsttäuschung keine Grenzen kennt. Die Frage ist, ob sie¹ die Grenze zwischen Dummheit und Betrug überschritten haben. Ist die Fusion jetzt in einem Stadium, in dem sie¹ versucht, die ganze Welt absichtlich zu täuschen?“** [10].

Möglich, dass Sie sich fragen, „Warum dann noch eine Bewertung der Kernfusion?“.

Schaut man sich die heutige politische Realität an, träumen viele Parteien immer noch von einem Zeitalter unbeschränkt verfügbarer CO₂-freier Energie durch die Kernfusion. Es ist traurige Realität, dass man um den Ausbau der Erneuerbaren Energien und um die Umsetzung des [Pariser Klimaabkommens](#) Angst haben muss.

Der Wunsch, die Kernfusion als „Technologie der Zukunft“ anzusehen, wird aber auch wach gehalten durch militärische Interessen, durch eine große Fusionscommunity, sowie auch durch unbewegliche Bürokraten in nationalen und internationalen Ämtern sowie Lobbyarbeit und Politikern, die nur in Zeithorizonten ihrer Wahlperioden denken.

Es ist deshalb zu fürchten, dass noch etliche Zeit vergeht, bis verantwortungsvolle Politiker einen klaren Blick und klare Entscheidungen entsprechend des TAB Berichtes gegen sinnlose Energie-Träume treffen.

Deshalb bedarf es noch einer längeren öffentlichen Diskussion, in der Argumente dieser Sammlung gegen die Kernfusion im Allgemeinen und speziell unter Magnetfeldeinschluss dienlich sein sollen.

Wie ist die FAQ-Sammlung aufgebaut?

Die in den nachfolgenden Kapiteln aufgeführten FAQs sind nach Themenkomplexe gegliedert. Der Umfang der Antworten variiert. In den Antworten gibt es folgende Verweistypen:

- Eingeleitet mit dem Zeichen ↗ Verweise auf informative externe Internetbeiträge, die sich direkt auf den Text beziehen.
- Umschlossen mit eckigen Klammern [] Verweise auf das Quellenverzeichnis. Bei Themen, die auch im TAB-Bericht handelt worden sind, wird immer auf dieses Grundsatzdokument verwiesen.
- Eingeleitet mit „siehe ...“ gibt es Querverweise zwischen den Fragen.

¹ sie = die Verfechter der Kernfusion

2. Zusammenfassung

Nachfolgende Auflistung der Hauptargumente gegen die Kernfusion enthält jeweils Querverweise zu den entsprechenden ausführlichen Antworten in diesem Dokument.

1. Die Fusionscommunity baut verzerrte Bilder für die Öffentlichkeit auf:

- Das erschwert die Meinungsbildung und Entscheidungsfindung in Politik, Gesellschaft und Wirtschaft (siehe Seite 17).

2. Die Fusionsforschung bindet wesentliche Forschungsgelder:

- Die Fusionsforschung entzieht dringend benötigte Gelder der Forschungslandschaft für Erneuerbare Energien (siehe Seite 9).
- Notwendige Entscheidungen zur Roadmap von Eurofusion werden nicht getroffen (siehe Seiten 10 und 18).

3. Die Gesellschaft braucht keine Fusionskraftwerke, da diese Technologie:

- zu spät für eine Reduzierung des CO₂-Ausstoßes kommt (siehe Seite 13),
- mit gravierenden Nachhaltigkeitsproblemen (siehe Seite 8) verbunden wäre,
- aber uns von den Politikern als vermeintlicher Garant für ein ewiges Wachstum ohne Energieprobleme verkauft wird (siehe Seite 8 und 14),
- mit nicht regelbaren Grundlastkraftwerken schlecht in ein von Erneuerbaren Energien dominiertes Stromnetz integrierbar ist (siehe Seite 14).

4. Die technischen Showstopper:

- Die „Tritium Selbstversorgung“ wird als wahrscheinlicher Showstopper für die Kernfusion bezeichnet. Es könnte also sein, dass man vielleicht einmal ein Fusionskraftwerk starten kann, es dann jedoch wegen Brennstoffmangel wieder herunterfahren muss (siehe Seite 18).
- Die eingesetzten Materialien würden unter realen Produktionsbedingungen einem Neutronenbeschuss ausgesetzt werden, den man derzeit für die Materialtestung noch nicht simulieren kann. Damit basieren Aussagen zur Materialalterung, zur Ableitung der notwendigen Wartungsperioden, die wiederum Konsequenzen für die Wirtschaftlichkeit haben, auf einer sehr schwachen Datenlage (siehe Seite 22 und 25).

5. Auch an der Wirtschaftlichkeit werden Fusionskraftwerken scheitern:

- Das Fraunhofer-Institut ISI hat 2024 für zukünftige Grundlastkraftwerke jeglicher Art Kostenkipppunkte bei etwa 8 bzw. 9 cent / kWh für die Stromgestehungskosten auf dem Niveau von Photovoltaik und Windkraft ermittelt (siehe Seite 43).
- Doch die Bundesregierung argumentiert mit veralteten Stromkosten von 5 bis 8 cent / kWh aus dem Jahr 2005 (siehe Seite 43 und 44), die umgerechnet auf 2023 etwa 20-36 cent / kWh bedeuteten.
- Der Gesamtwirkungsgrad von Fusionskraftwerken wird im Bereich von 20 bis 30% liegen. Vielleicht wird er aber noch schlechter sein, da die thermische Energie bei ITER auf ca. 20000m³ verteilt wird (geringe Leistungsdichte) und damit die Energieabführung in Fusionsreaktoren ein noch nicht untersuchtes Problem sein kann (Seite 41).

- Weiterhin gehen kritische Fusionsforscher davon aus, dass Fusionskraftwerke auf Grund der Parameter „Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Wartbarkeit und Inspektionsfähigkeit“ nicht wirtschaftlich sein können, ein Wissensfeld, das bisher vernachlässigt wurde (Seite 41).

6. Die Umweltauswirkungen von Fusionskraftwerken werden kleingeredet:

- Die Einschätzung der Nachhaltigkeit von Fusionskraftwerken erfordert eine gründlichere globale Betrachtung der Ressourcenverfügbarkeit und der Langzeitfolgen für Umwelt sowie Gesellschaft (siehe Seite 8 und 26).
- Tritium ist wahrscheinlich ein in seiner radiotoxikologischen Wirkung unterschätztes Isotop, müsste jedoch massenhaft produziert und transportiert werden (siehe Seite 31).
- Die Folgen von globalen Tritium-Emissionen aus einer breit angewendeten Technologie von Fusionskraftwerken wurden nicht genügend analysiert (siehe Seite 28).
- Tritium ist der Grund, warum nur ferngelenkte Automaten die Wartung und die Abfallbearbeitung machen können (siehe Seite 37).
- Die radioaktiven Abfallmengen von Fusionskraftwerken werden ein Vielfaches der von Kernkraftwerken sein (siehe Seite 36).
- Fusionskraftwerke benötigen auch Endlager (siehe Seite 37).
- Fusionskraftwerke benötigen zusätzlich sichere oberirdische Lager für die mittelfristige Lagerung von radioaktiven Abfällen (siehe Seite 37).

7. Fusionsforschung bleibt aber für das Militär interessant:

- Fusionskraftwerke tragen zur [Proliferation](#) bei, wenn mit ihrer Hilfe Material gewonnen wird, das direkt oder nach weiteren Verarbeitungsschritten zur Herstellung von Kernwaffen eingesetzt werden kann (siehe Seite 15).

3. Gesellschaftliche Aspekte

Nachhaltigkeit

Könnten Fusionskraftwerke ein ewiges Wachstum ermöglichen?

In einer Zeit der begrenzten Ressourcen an fossilen Energien (Öl, Gas und Kohle) gepaart mit dem Problem der Erderwärmung durch das CO₂, wird als vermeintliche Lösung des Problems die Kernfusion als fast unerschöpfliche Energiequelle angepriesen. Das weltweit vorherrschende Wirtschaftssystem ist der Kapitalismus und dieser ist auf ewiges Wachstum angewiesen. Dieser systemstabilisierende [Wachstumsimperativ](#) bestimmt das Handeln aller politischen Entscheidungsträger. Eine Gesellschaft, die sich nur am Wachstum orientiert, ist angesichts der planetarischen Grenzen dem Untergang geweiht. Dies ist die Quintessenz der berühmten Studie des [Club of Rome](#) aus den 70iger Jahren [11]. Wer global denkt, sollte zustimmen, dass das Überwinden des [Wachstums-Narrativs](#) die wesentlichste Aufgabe der Zukunft darstellt. Dazu gibt es schon zaghafte Ansätze ([Wachstumskritik](#), [Postwachstumsökonomie](#), [Degrowth](#)), doch der Weg ist noch weit bis diese in der Politik angekommen sind.

Tip: Nehmen Sie sich Zeit und bewerten alle sogenannten Vorteile von Fusionskraftwerken sowie die Versprechen der Fusionscommunity bezüglich obiger Frage.

Wie ist die Nachhaltigkeit von Fusionskraftwerken einzuschätzen?

Bevor man sich die Frage zur Nachhaltigkeit stellt, sollte man sich bezüglich der Sinnhaftigkeit des Wachstums-Narrativs positionieren.

In diesem Sinne sollte man die Nachhaltigkeitsdefinition des [Brundtland-Berichts](#)

“Nachhaltig ist eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen.“

heranziehen.

Die Nachhaltigkeit von Fusionskraftwerken unter obiger Definition erfordert eine gründliche globale Betrachtung der Ressourcenverfügbarkeit und der Langzeitfolgen für Umwelt sowie Gesellschaft. Eine umfassende Nachhaltigkeitsanalyse sollte gefordert werden, bevor weitere Forschungsgelder für die Fusionsforschung ausgegeben werden.

Forschungspolitik

Warum werden so viele Fusions-Start-Ups derzeit gegründet? Ist eine kontrollierte Kernfusion so einfach zu realisieren?

Man sagt, die Gründung von vielen Fusions-Start-ups in Deutschland und weltweit spiegelt das zunehmende Interesse an innovativen Energiequellen und den technologischen Fortschritten wider. Aber die eigentliche Triebkraft ist wahrscheinlich, dass Risikokapitalgeber in der Fusion ein zukünftiges Marktpotenzial und Profit wittern. Deshalb wird in Fusions-Start-Ups investiert. Und staatliche Förderprogramme bieten Anreize für private Investoren. So werden in Deutschland über die Bundesagentur für Sprunginnovation in den Jahren 2023 bis 2028 für Start-ups bis zu 90 Millionen Euro

zur Verfügung stehen [12]. Zusätzlich kann es Partnerschaften der Fusions-Start-Ups mit öffentlichen Forschungsinstitutionen geben, die den Zugang zu staatlich finanzierten Infrastrukturen und Expertise ermöglichen.

Unabhängig von dieser Förderung bleibt aber die Realisierung einer kontrollierten Kernfusion eines der technisch komplexesten Themen.

Warum brauchen wir keine Fusionsforschung?

Dass Physiker es schaffen, im Labormaßstab Kernfusionen zu erzeugen, ist nicht der Maßstab, dieses Wissen auch bis zu einer technischen Reife weiterzuentwickeln. Die Fakten sind aus der Grundlagenforschung bekannt: Es wird nie eine praktisch kontrollierte Kernfusion zur Stromerzeugung auf der Erde geben.

Trotzdem gibt es einen internationalen Wettlauf in der Fusionsforschung. Der Wissenschaftliche Dienst des Bundestages hatte 2023 die internationale Forschungslandschaft analysiert [13].

Führen die derzeitigen Ausgaben für die Fusionsforschung zu Defiziten an anderer Stelle?

Ja! Das [Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag](#) hat letztmalig 2001 die Ausgaben für die Fusionsforschung und für die Erneuerbaren Energien verglichen (Abbildung 2) [14]. Wenn man bedenkt, dass man offiziell ohnehin erst in vielen Jahrzehnten mit einer Umsetzung der Ergebnisse der Fusionsforschung rechnet, dann entzieht die Fusionsforschung massiv Geld der Forschungslandschaft für Erneuerbare Energien.

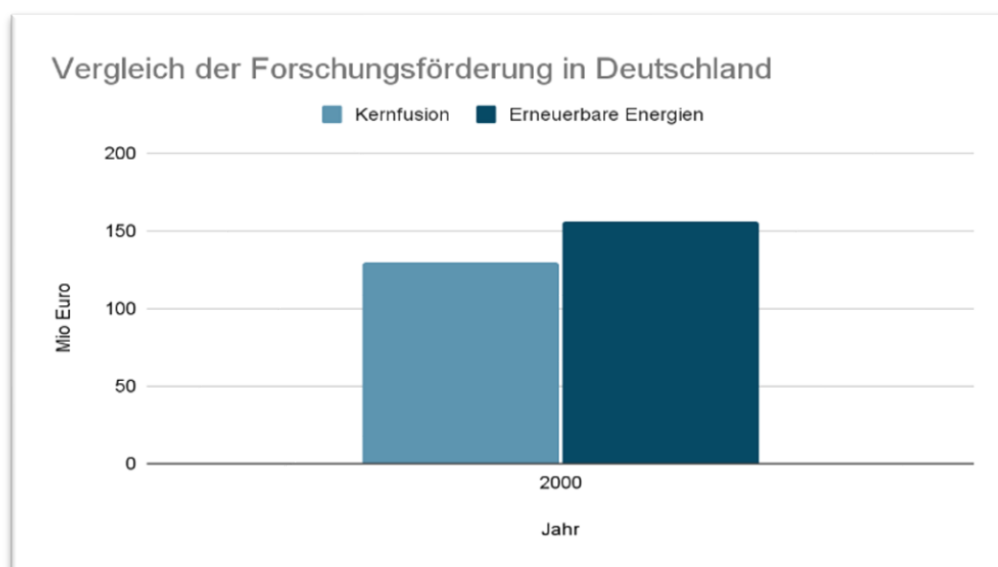


Abbildung 2: Forschungsförderung in Deutschland im Jahr 2000;
Eigene Darstellung mit Daten aus [14]

Wer begriffen hat, dass die zukünftige Energieversorgung ohne die Kernfusion auskommen kann, bzw. wer die Aussichtslosigkeit dieser Forschung erkennt, wird die begrenzten Forschungsgelder auf sinnvollere Themenfelder aufteilen. Außerdem sollte ein Land mit Defiziten im Finanzhaushalt das Einsparpotential bei ITER ausnutzen.

Doch die Bundesrepublik Deutschland ist noch nicht auf diesem Kurs, sondern forciert

sogar die Forschung auf diesem Gebiet. Mit dem Förderprogramm [↗“Fusion 2040 – Forschung auf dem Weg zum Fusionskraftwerk“](#) mit einem Volumen von einer Milliarde Euro bis 2029 wurden die Ausgaben für die Fusionsforschung nochmals gesteigert [15]. Aber Deutschland zahlt noch mehr in die Fusionsforschung ein und zwar über den Umweg der EU. Im Zeitraum 2021 bis 2025 wird die europäische Fusionsforschung unter dem Namen [↗EUROfusion](#) mit 549,4 Mio. Euro von [↗EURATOM](#) und zusätzlich mit weiteren 450 Mio. Euro von den Mitgliedstaaten finanziert.

Wieso kann man DEMO planen, ohne ITER zum Laufen zu bringen?

Leider ist es an dieser Stelle für Außenstehende nicht möglich zu erklären, warum man DEMO [16], einen auf ITER aufbauenden Fusionsreaktor, schon heute konzipieren kann, ohne Ergebnisse von ITER abzuwarten? Weiß man schon alles? Wenn ja, dann ist es an der Zeit, ITER zu begraben. Wenn nein, dann ist die Effektivität der parallelen Forschungsvorhaben zu hinterfragen. (Siehe auch: „Welche Unwägbarkeiten enthält die European Fusion Roadmap?“)

Müssten die in der Fusionsforschung Tätigen bei einem Wegfall der Fusionsforschung fürchten, arbeitslos zu werden?

Nein! Die Forschungslandschaft befindet sich eigentlich immer in einem ständigen Transformationsprozess. Wenn Forschungsgelder der Fusionsforschung auf sinnvolle gesellschaftlich relevante Themen umgelenkt werden, dann eröffnet dies neue Wirkungsbereiche für die vielen klugen Köpfe. Die Kompetenzen, die in der Fusionsforschung entwickelt wurden – darunter Fähigkeiten in Physik, Ingenieurwesen, Datenanalyse und Materialwissenschaften – sind hochgradig übertragbar und können multivalent angewendet werden. Aber auch Umschulungen und sozialverträgliche Lösungen sollten möglich sein.

Ein Gradmesser für einen Kurswechsel in der Forschungspolitik könnten die jungen Studenten sein. Wenn immer mehr Studenten erkennen, dass ITER oder andere Fusionsexperimente eine Sackgasse in ihrer Karriere wären, dann ist das das Ende der Kernfusionsforschung.

In welche Forschungsrichtungen sollte man die Gelder der Fusionsforschung umleiten?

Zur Durchsetzung einer erfolgreichen, auf Erneuerbaren Energien basierenden Energiewende ist Deutschland auf Fortschritte in mehreren Forschungsfeldern abhängig.

Der [↗“Bundesbericht - Energieforschung 2024 - Forschungsförderung für die Energiewende“](#) weist im Kapitel “2. Projektförderung” alle relevanten Themen aus. Das [↗BMWK](#) gliedert diese Förderung in [17]:

- Strategische Förderformate
- Energiewende in den Verbrauchssektoren
- Energieerzeugung
- Systemintegration
- Systemübergreifende Forschungsthemen

Das BMWK benennt auch das Themenfeld “Energieeinsparung”. Doch mit dem Hintergrundwissen aus der Frage “Könnten Fusionskraftwerke ein ewiges Wachstum ermöglichen?” reicht das nicht und man sollte beginnen, das komplexe Themenfeld “Wie kann man unsere Wirtschaft in eine Wirtschaft ohne Wachstum erfolgreich transformieren?” wissenschaftlich zu bearbeiten.

Zu kritisieren ist, dass das BMWK ebenfalls die Fusionsforschung als Förderschwerpunkt ausgewiesen hat.

Politik

Wie positioniert sich die Bundesregierung zur Kernfusion?

Die Forschungslandschaft wurde in Deutschland schon sehr früh und zielgerichtet bezüglich der Kerntechnik und Kernfusion in den Nachkriegsjahren entwickelt. Zur Koordinierung gründete man das [↗“Bundesministerium für Atomfragen”](#) 1955. Der Wissenschaftsrat resümierte 1991 in der Würdigung des Aufbaus von Großforschungseinrichtungen rückblickend: [18]:

“Ein bedeutsamer Vorstoß in neue Dimensionen außeruniversitärer Forschung vollzog sich in der zweiten Hälfte der 50er Jahre. Zwischen 1956 und 1960 wurden nicht weniger als sechs der heute insgesamt dreizehn Großforschungseinrichtungen gegründet:

- 1956 das Kernforschungszentrum Karlsruhe KfK, die Kernforschungsanlage Jülich (KFA) und die Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffbau und Schifffahrt mbH in Geesthacht (GKSS),
- 1957 das Hahn-Meitner-Institut für Kernforschung in Berlin (HMI),
- 1959 das Deutsche Elektron-Synchrotron in Hamburg (DESY) und
- 1960 das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching (IPP)”

Die deutsche Forschung zur Kernfusion ist eng an den [↗EURATOM](#)-Vertrag gebunden.

Der Wissenschaftliche Dienst des Bundestages hat 2019 einen Sachstandsbericht: “Sachstand - Einzelfragen zur Kernfusionsforschung, Kosten und Programme” veröffentlicht [19].

Die Bundesregierung hat 2023 verkündet, die Fusionsforschung in den nächsten fünf Jahren mit einem [↗Förderprogramm zur Fusionsforschung](#) mit mehr als einer Milliarde Euro zu stärken. Das Geld fließt in das neue Förderprogramm „Fusion 2040“, das den Weg zu Deutschlands ersten Fusionskraftwerk ebnen soll.

Die zukünftige Bundesregierung sollte erkennen, dass bei der Fusionsforschung kräftig gespart werden kann. Bei einem knappen Etat sollte unsinnige Forschung nicht weiter gefördert werden.

Welche Stellungen beziehen die Parteien zur Kernfusion?

Man sollte meinen, dass sich die Parteien in den Wahlprogrammen zur Bundestagswahl 2025 im Rahmen der Energiepolitik auch konkret zur Einschätzung der Kernfusion äußern würden. Zum Redaktionsschluss dieses Dokumentes liegen viele Parteiprogramme jedoch nur als Entwurf vor. Nur CDU/CSU, FDP und BSW hatten sich klar für die Kernfusionsforschung bekannt. Aber klare Bekenntnisse gegen die Kernfusion fehlen. Ist das Wahltaktik, nichts dazu zu schreiben und sich einen großen Spielraum lassen?

Um sich zu dieser Frage einen Überblick über das tatsächliche bisherige politische Handeln zu verschaffen, eignet sich das Dokument “Beschlussempfehlung und Bericht” aus dem Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Bundestages zu dem Antrag der Fraktion der CDU/CSU “Stärkung der Fusionsforschung

auf Weltklassenniveau" vom 01.02.2024 [20]. Der Ausschuss hat zwar die Ablehnung des Antrags empfohlen, aber man sieht, dass sich die Parteien des 18. Bundestages bezüglich der Kernfusion eigentlich einig sind:

- CDU/CSU: Der Antrag ist ein Bekenntnis zur Fusionsenergie
- SPD: Man muss eine realistische Perspektive beibehalten. Die Kernfusion kommt zur Erfüllung der Klimaziele zu spät. Angesichts der Kostenexplosion von ITER muss der Antragsteller Finanzierungsvorschläge für das Vorhaben zweier neuer Demonstrationsreaktoren nennen.
- AfD: Man muss die Kernfusion als langfristige Lösung im Blick behalten. Die Energiewende habe zu hohen Strompreisen geführt und Deutschland von der ausländischen Stromversorgung abhängig gemacht.
- BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Die Fraktion erkennt die Bedeutung der Kernfusion an und sieht in dieser Technologie erhebliche Chancen und Potenziale. Diese Technologie wird jedoch nicht zur Klimaneutralität bis 2045 beitragen können.
- DIE LINKE: Zur Erreichung der Klimaziele bis 2045 muss man sich auf den Ausbau der erneuerbaren Energien konzentrieren. Man müsse erforschen, ob die Nutzung der bisherigen Kernkraftwerksstandorte für Fusionsreaktoren in Betracht kommen. Man muss die Fusionskraftwerke in der Nähe der großen Industrieverbraucher etablieren.
- FDP: Die FDP-Fraktion bekennt sich zur Kernfusionsforschung. In Zeiten sparsamer Haushaltsführung geht es um Priorisierungen.

Störfallszenarien

Wie angreifbar werden Fusionskraftwerke im Friedens- und im Krisenfall sein?

Kraftwerke, egal welcher Art, sind Infrastrukturobjekte, die im Frieden potentielle Ziele für erpresserische Hackerangriffe aus dem Internet, aber im Krisenfall auch Ziele für physische Angriffe sind.

Natürlich weiß man in der EU und in Deutschland um diese Probleme und hat deshalb entsprechende Richtlinien und Gesetze ([↗Critical Entities Resilience / CER-Richtlinie](#), [↗KRITIS-Dachgesetz](#)) erlassen. Doch es ist fraglich, wie effektiv uns diese Maßnahmen tatsächlich schützen würden.

Rechtlicher Rahmen

Braucht es für die Kernfusion ein eigenes rechtliches Regelwerk oder reicht das Atomgesetz?

Die Errichtung und der Betrieb künftiger Fusionskraftwerke zur kommerziellen Energiegewinnung wären auf der Grundlage des geltenden [↗Atomgesetzes](#) nicht möglich. Eine Überprüfung und Anpassung des Atomgesetzes bezüglich der Fusionstechnologie ist notwendig [21]. Es wird eingeschätzt, dass es kaum vorstellbar ist, dass eine transnationale gemeinsame Regulierung von Fusionskraftwerken erreicht werden könnte [4].

Zugegeben, für das [↗Atomgesetz](#) ist der Begriff "Kernfusion" derzeit ein Fremdwort. Aber der §1 "Zweckbestimmung des Gesetzes" ist so allgemein, dass diese Zwecke

sowohl für die Kernspaltung als auch für die Kernfusion gelten, nur der erste Absatz müsste angepasst werden [21]. Es müssen ebenfalls die Begriffsbestimmungen angepasst werden, da es derzeit insbesondere spaltbare Kernbrennstoffe in den Mittelpunkt rückt (AtG §2 (1)) und die kerntechnischen Anlagen zu eng definiert (AtG §2 (3a)) [21].

Unterhalb des [Atomgesetzes](#) muss das untergesetzliche Regelwerk z.B. die ["Sicherheitsanforderungen an den Betrieb von Kernkraftwerken"](#) bezüglich der Kernfusion präzisiert werden. Der Wissenschaftliche Dienst des Bundestages hat eine Liste von Punkten veröffentlicht, die bei der Ausarbeitung / Präzisierung künftiger Vorschriften zur Kernfusion Berücksichtigung finden sollten [21]. Weiterhin gab der Wissenschaftliche Dienst des Bundestages zu Bedenken, dass auch innerhalb der EU ein offener Regelungsbedarf besteht, der Rückwirkungen auf Deutschland haben wird [21].

Übrigens ist die CDU/CSU-Fraktion mit dem Antrag ([20/10383](#)) im Bundestagsausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung gescheitert, in dem ein eigenständiger Rechtsrahmen für Fusionskraftwerke in Deutschland und der Europäischen Union gefordert wurde [20].

4. Energietransformation

Klimawandel

Würden Fusionskraftwerke tatsächlich etwas zur Bewältigung des Klimawandels beitragen können?

Es gibt viele Gründe, weshalb auf diese Frage ein klares NEIN zu setzen ist. An dieser Stelle werden jedoch nur die wichtigsten Argumente zusammenfassend dargestellt:

1. Es gibt reale Hürden für eine technische Umsetzung von Fusionskraftwerken zum Zweck der Energiegewinnung. Diese sind so groß, dass Fusionskraftwerke im Bereich der Illusionen anzusiedeln sind.
2. Auch wenn diese realen Hürden nicht existieren würden, würden solche Kraftwerke wegen der hohen Investitionen und der langen Bauzeiten zur Bewältigung des Klimawandels viel zu spät kommen, gleichzeitig aber benötigte Ressourcen für die Transformation des Energiesektors mittels anderer Technologien binden.

D.h. die Dekarbonisierung des Energiesektors muss ohne Fusionskraftwerke geplant und durchgesetzt werden.

Auch wurde bisher aus der Sicht der Fusionscommunity kein Programm vorgeschlagen, wie in den nächsten 50 Jahren auch nur ein geringer Anteil an Strom produziert werden kann.

Energiebedarf

Wie realistisch ist der prognostizierte Energiehunger der Menschheit in der Zukunft?

Der ["Club of Rome"](#) ging in seinen Modellrechnungen von einem 4 bis 5%igen Wachstum aus [22]. Das ist dann zwar nicht eingetreten, hat aber die Menschheit wachgerüttelt. Dennoch gibt es einen exponentiellen Anstieg des Welt-Primärenergiebedarfs. Laut [Enerdata](#) beschleunigte sich das Wachstum des weltweiten

Energieverbrauchs im Jahr 2023 (+2,2 %) und lag damit deutlich über der durchschnittlichen Wachstumsrate der Jahre 2010-2019 (+1,5 %/Jahr). Dabei haben bestimmte Regionen besonders hohe Zuwachsraten (China + 6,6%).

Fakt ist auch, dass sich der [weltweite Primärenergieverbrauch](#) pro Person von 1965 von ca. 13 MWh auf 21 MWh im Jahr 2023 um 65% erhöht hat. Damit muss man mit einem Anstieg des Primärenergieverbrauchs um ca. 25% schon alleine wegen des erwarteten [Zuwachses der Weltbevölkerung bis 2080](#) rechnen, die sich dann auf einem Maximum befinden soll.

Warum orientiert sich die Elite der Gesellschaft immer noch an Wachstumskonzepten?

In den 1970er Jahren wurde mit dem [Club-of-Rome](#) und dem Bericht [„Grenzen des Wachstums“ \(1972\)](#) der Grundstein für eine öffentliche "Wachstumskritik" gelegt. Aber was ist seit dieser Zeit passiert? Im [Lexikon der Nachhaltigkeit](#) kann man lesen: "Aus heutiger Perspektive zeigt sich, dass trotz 60 Jahre Wachstumskritik im Konfliktfall Wirtschaftswachstum als politischer Imperativ Vorrang hat."

Was versteht man unter dem Begriff "physikalische Grenzen des Wachstums" in Bezug auf den zukünftigen Energiebedarf der Erde?

In den ersten beiden Berichten an den [Club of Rome](#) (1972 / 1974) wurden als Ursachen für eine globale Erwärmung neben dem anthropogenen Treibhauseffekt auch erstmals die „thermische Umweltverschmutzung“ diskutiert.

Als „thermische Umweltverschmutzung“ sind alle Energiequellen zu verstehen, die nicht unter der Überschrift "Erneuerbare Energien" (Photovoltaik, Solarthermie, Wasserkraft, Windkraft, Umgebungswärme, Bioenergie, Meeresenergie) zu subsumieren sind.

Darauf aufbauend modellierten Wissenschaftler bei einem ungebremsten exponentiell ansteigenden Energieverbrauch aus nicht regenerativen Energien die Erwärmung der Erde [23], [24], [25], [26], [11]. Murphy (2022) wies darauf hin, dass bei einer Wachstumsrate des Primärenergieverbrauchs von 2,3% die Erde in etwa 400 Jahren so heiß werden könnte, dass sie unbewohnbar wäre. Er betont, dass dies eine der wichtigsten physikalischen Grenzen ist, die gegen unkontrolliertes Wachstum sprechen, unabhängig von allen technischen Fortschritten. Sein Resümee: "Wir wären gut beraten, für eine Postwachstumswelt zu planen. Wissenschaftler haben eine besondere gesellschaftliche Verantwortung, langfristige Bedrohungen zu erkennen und der Menschheit zu helfen, diese abzuwenden." [11]

Bedarfsgerechte Versorgung

Könnte man Fusionskraftwerke leicht, entsprechend der aktuellen Stromnachfrage im Stromnetz, regeln?

In einem zukünftigen Energiesystem, das vorwiegend aus Erneuerbaren Energien wie Wind- und Solarenergie besteht, ergeben sich spezifische Anforderungen an die Regelbarkeit und Flexibilität zusätzlicher Energiequellen. Diese Anforderungen zielen darauf ab, die Netzstabilität zu gewährleisten und die fluktuierende Einspeisung Erneuerbarer Energien auszugleichen. Da die Stromproduktion über Wind und Sonne stark wetterabhängig ist, müssen Spitzenlasten und plötzliche Nachfrageänderungen flexibel abgefangen werden.

Fusionskraftwerke sind wie Atomkraftwerke praktisch nicht regelbarer. D.h. Fusionskraftwerke wären also nur teure Grundlastkraftwerke, die zukünftige Energienetze nicht zielführend verbessern.

Könnte man Fusionskraftwerke leicht in vorhandene Stromnetze integrieren?

Im Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung finden Fusionskraftwerke keine Erwähnung, sondern man setzt folgende Zielstellung:

“Die Energieversorgung muss spätestens bis 2050 nahezu vollständig dekarbonisiert erfolgen. Die Energiewende hat einen beispiellosen Wandel in der Energiewirtschaft ausgelöst. Innerhalb weniger Jahre sind die Erneuerbaren Energien von einer Nischentechnologie zur wichtigsten Stromquelle in Deutschland geworden. Diesen Wandel wollen wir konsequent fortsetzen. Strom aus Erneuerbaren Energien wird im zukünftigen Energiesystem der zentrale Energieträger sein” [27]. Hier haben Atom- und Fusionskraftwerke als Grundlastkraftwerke keinen Platz!

Demgegenüber stellt man im Impulsbeitrag von ESYS im Abschnitt “Kernfusion als Teil eines klimaneutralen Energiesystems” in Aussicht, dass man in Ländern, die in ihrem Energiesystem weiterhin verstärkt auf Großkraftwerke setzen, dass man diese sukzessive in Zukunft mit Fusionskraftwerken ersetzen kann [28]. Dadurch möchte man vorhandene Stromnetze optimal nutzen.

Könnte man Fusionskraftwerke für die Trinkwassergewinnung aus Meerwasser in den südlichen Problemzonen einsetzen?

Solch ein Vorschlag wurde aus der Verlegenheit geboren, dass Fusionskraftwerke sogenannte Grundlastkraftwerke sind, die immer laufen müssen, um rentabel zu sein. Solche Fusionskraftwerke passen eigentlich nicht in ein Stromnetz, das durch Erneuerbare Energie dominiert ist. Also haben sich Verkäufer dieser noch nicht einsatzfähigen Technik über andere Anwendungsfelder Gedanken gemacht. Und sie suchten nach Anwendungsfeldern, in denen Fusionskraftwerke Tag ein Tag aus, eine Aufgabe erfüllen sollen. Und so kam man auf die Idee, einem Fusionskraftwerk in den südlichen Problemzonen die Aufgabe zu geben, Strom zu produzieren und gleichzeitig Meerwasser zu entsalzen.

Ob das eine gute Idee ist, sollten andere prüfen - aber im Süden wird man in naher Zukunft noch mehr Strom über die Sonne gewinnen, mehr als man braucht. Und auch da passen Grundlastkraftwerke nicht hin.

5. Militärische Aspekte

Warum ist das Militär an der Fusionsforschung interessiert?

Proliferation

Fusionskraftwerke tragen zur [Proliferation](#) bei, wenn mit ihrer Hilfe Material gewonnen wird, das direkt oder nach weiteren Verarbeitungsschritten zur Herstellung von Kernwaffen eingesetzt werden kann. Ebenfalls zu den Proliferationsrisiken zählen die Aneignung und der Umgang mit Schlüsseltechnologien für die Entwicklung von Kernwaffen. Bei Kernfusion mit magnetischem Einschluss sind insbesondere zwei Faktoren für eine mögliche Proliferation relevant: das in der Anlage als Brennstoff verwendete

Tritium und die Möglichkeit, mit Hilfe der in der Fusionsreaktion erzeugten Neutronen spaltbare Materialien zu erbrüten [14], [4].

Tritium

Tritium stellt ein wesentliches Proliferationsrisiko beim Betrieb von Fusionsreaktoren dar, da es als Sprengkraftverstärker ein Bestandteil fortgeschrittener Kernwaffendesigns ist [4]. Die genaue Bilanzierung des Tritiuminventars in einer Fusionsanlage ist schwierig. Zudem können einige Gramm Tritium leicht mit tragbaren Speichern transportiert werden, die mit heute etablierten Kontrolltechniken kaum zu detektieren sind [14].

Spaltbares Material

Das Risiko der Erbrütung waffenfähiger spaltbarer Materialien ist bei einem reinen Fusionsreaktor als eher niedriger einzuschätzen als bei einem Spaltreaktor [14], da bei einem Fusionsreaktor ohnehin alle Neutronen eigentlich zum Erbrüten von Tritium gebraucht werden.

Fusionswaffen

Die Ausdrücke [↗Kernwaffen und nukleare Waffen](#) sind Oberbegriffe für alle Arten von Waffen, die Energiegewinne aus Kernreaktionen ausnutzen. Zu den Waffen, die auf Kernfusionen basieren gehören:

- [↗Wasserstoffbombe](#) (H-Bombe)
- [↗Neutronenbombe](#)
- [↗Kobaltbombe](#)

Der Begriff "Fusionswaffe" oder auch [↗"Fusionsbombe"](#) ist eher ungebräuchlich. Anstelle dessen wird aus dem Englischsprachigen der Begriff [↗"Thermonuclear weapon"](#) benutzt. Über den [↗Kernwaffenbestand](#) in der Welt gibt es relativ gute Übersichten, für Thermonukleare Sprengköpfe jedoch nicht.

Warum ist die internationale Atomenergiebehörde (IAEA) so oberflächlich bei der Beantwortung der Frage: "Can fusion reactors be used to produce weapons?"

Die [↗IAEA](#) streitet in ihren FAQs dagegen ab, dass man Tritium aus Fusionsreaktoren abzweigen kann, um in Kernwaffen eingesetzt zu werden. Sie begründet das damit, dass alles Tritium wieder im eigenen Reaktor verbraucht wird.

Das stimmt nicht, denn in die Konzeption der Reaktoren fließt ein, dass man mehr Tritium erbrüten muss, um die zum Start notwendige Menge Tritium für einen weiteren Reaktor zu produzieren. Die Zeit, um diese notwendige Menge zu erbrüten, wird als "doubling time" bezeichnet [29]. (Siehe auch: „Warum ist das "Tritium-Breeding-Verhältnis" nicht die entscheidende Größe für die Tritium-Selbstversorgung in einem Fusionskraftwerk?“)

6. Technische Aspekte

Durchbrüche und Roadmaps

Wie sind die “Durchbrüche” bei der Kernfusionsforschung zu beurteilen?

Die Erforschung der Kernfusion wurde zunächst mit dem Ziel der militärischen Waffententwicklung verfolgt und erfolgte deshalb hinter verschlossenen Türen ([↗Wikipedia](#)). Seit den 1950er Jahren gibt es wichtige experimentelle Meilensteine in der Erforschung der Kernfusion:

- Erste kontrollierte Plasmaerzeugung (1950er Jahre)
- Erster Plasmaeinschluss im Tokamak ([↗1968](#))
- Princeton Large Torus: Plasma mit über 60 Millionen Grad Celsius erzeugt ([↗1978](#))
- JET erzeugt Fusionsenergie von 16 MJ ([↗1997](#))
- NIF Erste Netto-Energieerzeugung mit Lasern gezündet ([↗2022](#))

Keine Frage, das sind technische Leistungen, aber Durchbrüche?

Gerade die beiden letzten Meldungen muss man relativieren. Denn wie viel Wasser könnte man mit der erzeugten Energie von JET von 20°C auf 100°C erhitzen? Es sind ganze 47 ml Wasser!

Bei JET hat man das erste Mal in einer mikroskopischen Menge Deuterium und Tritium fusioniert und dabei über 2 Sekunden 16 MJ kinetische Energie der Neutronen freigesetzt. Gleichzeitig benötigte man aber 24 MW Energie zum Heizen für die Dauer des Versuches. Bei diesem Weltrekord wurde aber nicht berichtet, wie viel Energie man vorher zum Anheizen von JET reingesteckt hatte.

Und die Meldung von 2022 hat man sich auch nur schöngerechnet. [↗Konkret](#) sollen etwa 2 MJ an Energie eingesetzt worden sein, um am Ende 3 MJ zu erhalten, d.h. eine Netto-Energieerzeugung von einem 1 MJ. Bei dieser Rechnung hatte man wiederum nicht die rund 300 MJ an Energie, die für den Betrieb der Lasergeräte aufgewendet werden mussten, in Rechnung gestellt.

Institutionen, die sich mit Fusionsforschung beschäftigen, stehen natürlich unter dem Druck, sich mittels Durchbruchmeldungen immer wieder mal in den Mittelpunkt der Öffentlichkeit zu stellen, um weitere Forschungsgelder erfolgreich einzuwerben.

Erstmalig wurde nun 2024 in dem Bericht „Auf dem Weg zu einem möglichen Kernfusionskraftwerk Wissenslücken und Forschungsbedarfe aus Sicht der Technikfolgenabschätzung“ Kritik an der Kommunikationsstrategie der Fusionscommunity zur absichtlichen Erzeugung von verzerrten Bildern vom tatsächlichen Forschungsstand der Kernfusion für die breite Öffentlichkeit geübt. Dies ist für eine rationale Meinungsbildung und Entscheidungsfindung in Gesellschaft und Politik in hohem Maße kontraproduktiv [\[4\]](#).

Welche Unwägbarkeiten enthält die European Fusion Roadmap?

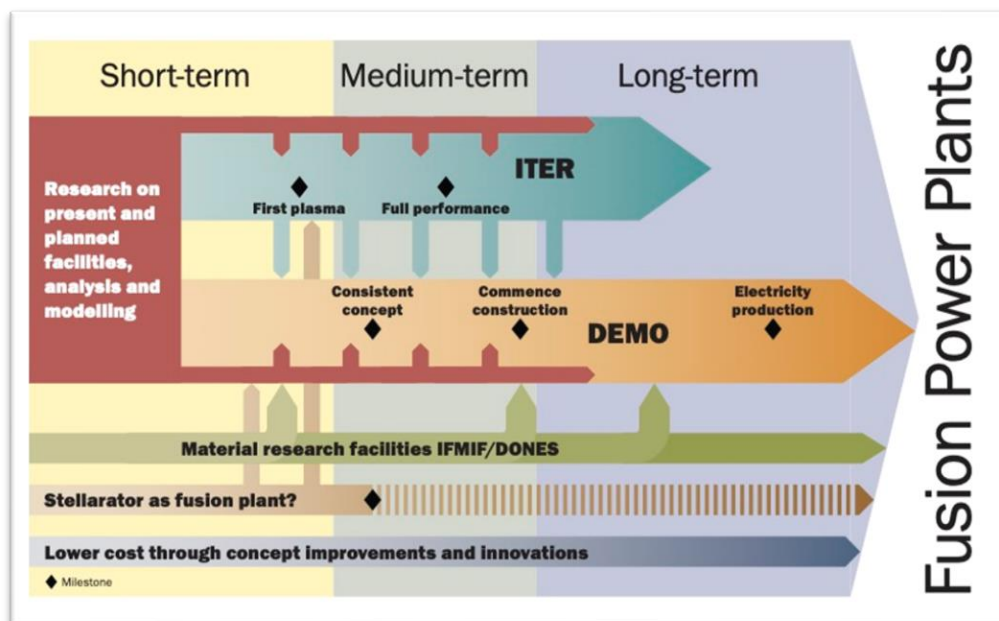


Abbildung 3: European Fusion Roadmap (2018); Entnommen aus [30]

Folgende Schwachpunkte fallen in der European Fusion Roadmap (Abbildung 3) ins Auge:

- Die dazugehörige Langfassung zu obiger Fusion Roadmap stammt aus dem September 2018 [16] - ein Update gibt es bis heute nicht [31]. Hat man schon aufgegeben ...?
- Die Roadmap enthält keine Jahreszahlen. Durch diesen Trick passt die Grafik immer. Aber welche Meilensteine wurden schon erreicht und wo befinden wir uns derzeit? Und auch im Text gibt es nur die generische Einteilung Short Term, Medium Term und Long Term.
- Die essentielle "Tritium Selbstversorgung" wird als „Mission 4“ in die Phase von DEMO, d.h. weit nach hinten verlegt [16]. Wozu baut man eine DEMO Anlage, wenn die Schlüsselfrage der "Tritium Selbstversorgung" noch nicht geklärt ist?
- Wie können essentielle Materialprüfungen noch bei ITER einfließen, wenn für die IFMIF /DONES der Bau erst 2023 angeblich begonnen worden ist?

Zu einer adäquaten Einschätzung dieser Roadmap ist auch der TAB Bericht gekommen [4].

Grundstoffe für die Kernfusion

Stehen Deuterium und Tritium tatsächlich unbegrenzt zur Verfügung?

Deuterium

Die natürliche Häufigkeit des Isotops Deuterium (^2H) beträgt auf der Erde 0,0156 % und es lässt sich wohl aufgrund des großen relativen Massenunterschieds zum normalen Wasserstoff ^1H leicht anreichern.

Tritium

Man schätzt, dass das Welt-Gesamtinventar von natürlichem Tritium ca. 7 kg beträgt. Diese Menge befindet sich im Gleichgewicht zwischen der natürlichen Bildung durch die Höhenstrahlung in den oberen Atmosphärenschichten und dem radioaktiven Zerfall ([↗IPP](#)).

Zu Zeiten der vielen Atombombentests war die Menge an Tritium allerdings wesentlich höher. Die weltweite Umweltbelastung durch den anthropogenen Anteil nahm erst nach 1965 ab. Doch man weiß auch, dass durch die Atomkraftwerke und Aufbereitungsanlagen kontinuierlich Tritium über die Abwässer und die Abluft in die Umwelt gelangen. Dennoch können Fusionsforscher nicht auf das natürliche Tritium, auf das in Fukushima gelagerte Tritium-haltige Abwasser und auch nicht auf das in die Umwelt emittierte Tritium zurückgreifen. Dafür scheint es gegenwärtig keine anwendungsreife Anreicherungsmethoden zu geben.

In den USA wurden bis 1988 Tritium und Plutonium in [↗Atomreaktoren für militärische Nutzungen](#) hergestellt, die dann aber wegen Sicherheitsmängeln stillgelegt wurden. In Kanada wird Tritium als Nebenprodukt in den sogenannten [↗CANDU-Reaktoren](#) (1,9 kg/Jahr) hergestellt [28]. Übrigens berichtete die [↗Wirtschaftswoche](#) im Ranking der teuersten Substanzen der Welt 2024, dass Tritium auf Platz 5 anzusiedeln ist.

Laut [↗scinexx.de](#) wird ITER in den 15 Jahren seiner geplanten Betriebsdauer etwa 20 kg an Tritium benötigen. Man schätzt heute das gesamte Welt-Gesamtinventar an Tritium auf 30 bis 40 kg. Tritium als Ausgangsstoff für Fusionskraftwerke zu planen, ist deshalb eine Herausforderung, wenn für ein theoretisches Fusionskraftwerk mit 1 GW /Jahr ein Verbrauch von mehr als 50 kg Tritium veranschlagt wird.

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. Und die Frage, ob eine Tritium-Selbstversorgung technisch überhaupt möglich ist, ist offen und sollte prioritär beantwortet werden [4].

Welche für die Fusionsreaktoren benötigten Materialien könnten neben Tritium Mangelware sein?

Bei allen eingesetzten Materialien gibt es hohe Anforderungen an die Reinheit. Die Gehalte an Verunreinigungen haben durch die Neutronenaktivierung einen entscheidenden Einfluss auf das spätere Abfallmanagement des jeweiligen Stoffes und damit auch auf den Preis dieser Grundstoffe (Siehe auch: "Gibt es Anforderungen an die Reinheit des Stahls, der in Fusionskraftwerken eingesetzt werden soll?" bzw. "Gibt es Anforderungen an die Reinheit des Berylliums, das in Fusionskraftwerken eingesetzt werden soll?")

Beryllium

Beryllium ist das 48. häufigste Element auf der Erde. Die Herstellung von metallischem Beryllium erfolgt durch Schmelzflusselektrolyse ([↗Wikipedia](#)). Doch Beryllium steht für ein breit angelegtes Fusionsausbauprogramm nicht in ausreichender Menge zur Verfügung [4].

Helium

Helium als Nebenprodukt der Erdgasförderung könnte sich bei zurückgehender Erdgasförderung verknappen [4].

Lithium

Das für die Kernfusion vorgesehene Tritium muss über eine Kernreaktion aus Lithium hergestellt werden. Insofern muss man genügend Lithium haben. Lithium hat einen Anteil von etwa 0,006 % an der Erdkruste und ist damit das 27. häufigste Element. Der Abbau und die Gewinnung des Lithiums sind aufwändig und konkurrieren weiterhin mit anderen industriellen Anwendungsbereichen (z.B. Li-Akkus). Wichtiger ist aber, dass von den beiden natürlichen Isotopen von Lithium ${}^6\text{Li}$ (7,6 %) und ${}^7\text{Li}$ (92,4 %) das seltenere ${}^6\text{Li}$ für die Tritium Produktion bevorzugt wird ([↗Wikipedia](#)). Man geht davon aus, dass man für 1 GW Strom in einem Fusionsreaktor pro Jahr 500 kg ${}^6\text{Li}$ benötigt. Das ist aber unrealistisch, da man ${}^6\text{Li}$ in hohem Überschuss einsetzen muss, weil ansonsten die Trefferwahrscheinlichkeit der Neutronen bis zur nächsten Wartungsperiode auf Null sinkt. Insofern ist die Abschätzung der benötigten Lithiummenge in dem Artikel "Will fusion run out of fuel?" weit, weit untertrieben [32].

Wolfram

Wolfram ist das 26. häufigste Element auf der Erde. Aber Wolfram gilt als sogenannter Konfliktrohstoff, weil sein Abbau in Entwicklungsländern mit Menschenrechtsverletzungen, Korruption und Geldwäsche in Verbindung gebracht wird.

Tritium-Selbstversorgung

Warum ist das "Tritium-Breeding-Verhältnis" nicht die entscheidende Größe für die Tritium-Selbstversorgung in einem Fusionskraftwerk?

Die Fusionsforscher gehen von der Annahme aus, dass ein Fusionskraftwerk das im Prozess verbrauchte Tritium auch selbst in ausreichender Menge wieder erbrüten kann ("Tritium-Selbstversorgung"). Das wäre auch der einzig mögliche Weg, denn Tritium steht weltweit nicht in ausreichender Menge zur Verfügung.

Bei der Fusion von Tritium und Deuterium entsteht aber genau nur ein Neutron. Dieses wird direkt für die nächste Tritium-Produktion gebraucht. Aus diesem Grund wird versucht über sogenannte Neutronenvervielfacher mittels des Berylliums diesem Mangel zu begegnen [4]. Doch die Aussagen zur "Tritium-Selbstversorgung" basieren vorwiegend auf Simulationen [33] und sind damit quasi ungedeckte Schecks der Fusionscommunity. Die Relevanz dieses Punktes wurde in der Vergangenheit nur klar von außenstehenden Kritikern formuliert [5], [6], jedoch auch vereinzelt durch Insider. In einer EUROfusion Konferenz 2016 wurde die "Tritium-Selbstversorgung" als Showstopper für das DEMO Projekt bezeichnet [34]. Der TAB Bericht [4] hat die Relevanz der Frage der "Tritium-Selbstversorgung" auf eine qualitativ neue öffentlichkeitswirksame Stufe gehoben, an der auch verantwortungsvolle Politiker nicht mehr herumkommen.

Was heißt das im Detail? Für eine funktionierende "Tritium-Selbstversorgung" muss man ein technisch erforderliches Tritium-Breeding-Verhältnis (TBR) erreichen, damit der Reaktor nicht wegen Brennstoffmangel von sich aus ausgeht. Mit dem technischen Design eines hypothetischen Fusionsreaktors wurde ein technisch erforderliches TBR von mindestens 1,2 angegeben [29], [35]. Das bedeutet, dass durch den Fusionsprozess mindestens 20% mehr Tritium Atome zu erbrüten als zu verbrauchen sind.

In diesen Parameter "technisch erforderliches TBR" sind dann hoffentlich alle Verluste in dem Prozess des Erbrütens von Tritium subsumiert worden:

- Parasitäre Neutronen Kernreaktionen im Material,
- Unvollständige kontinuierliche Extraktion des Tritiums aus dem Blanketmaterial,
- Verlust über die Vakuumpumpen,
- Entweichen von Tritium durch Undichtigkeiten,
- Freisetzung von Tritium bei der Wartung,
- Natürlicher Zerfall von Tritium bis zum erneuten Einsatz,
- Verbleib von Tritium in ausgetauschten Reaktormaterialien,
- Notwendige Tritiumreserve für Wartungsperioden, Reparatur und etwaigen Fehlfunktionen des Reaktors,
- Vorrat für weitere Reaktoren erbrüten.

In Modellrechnungen zeigte man, dass man ein simuliertes realisierbares TBR von 1,05 bis 1,15 erreichen könnte [29]. Diese Zahl ist aber selbst für einen hypothetischen zukünftigen Fusionsreaktor zu gering. Außerdem wies man auf mögliche Modell- Ungenauigkeiten hin, da die berechnete Tritium Produktion um ca. 14% gegenüber dem Experiment überschätzt worden ist [36].

Wird man mit ITER eine Tritium-Selbstversorgung nachweisen können?

Das ist die alles entscheidende Frage! Doch ob die Ergebnisse bezüglich der Tritium-Selbstversorgung bei ITER wirklich klar interpretierbar sind, bleibt eigentlich offen. Denn für ITER hat man das sogenannte „Test Blanket Module (TBM) Program“ konzipiert. Dabei werden vier unterschiedliche Varianten:

- Wasser gekühlter Lithium-Blei Brüter (Europa);
- Wasser gekühlter Keramik Brüter (Japan);
- Helium gekühlter Keramik Brüter (China);
- Helium gekühlter Feststoff Brüter (Europa/Korea)

installiert. Jede dieser Varianten ist unabhängig, allerdings teilen sie sich das Fusions-Plasma. Um aussagekräftige Ergebnisse zu bekommen, müsste man die Fusion dann auch tatsächlich so lange laufen lassen, bis sich ein Verteilungsgleichgewicht in allen Komponenten eingestellt hat - eine Gleichung mit vielen Unbekannten. Man hofft so die beste Blanket Module Variante herauszufinden. Aber ist damit auch die Frage beantwortet, ob die Tritium-Selbstversorgung in einem Dauerbetrieb gesichert sein wird? Und welchen Einfluss hat der Dauerbetrieb bis zur nächsten Wartungsperiode auf die Eigenschaften der Blanket-Module? Unter Umständen sinkt das realisierbare TBR mit der Laufzeit.

Da das aktuell vorgesehene Testprogramm aus Sicht des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag nicht ausreicht, um die Tritiumselbstversorgung von DEMO zu erproben wurde die Forderung aufgestellt: **„Die Frage, ob eine Selbstversorgung von Kraftwerken mit Tritium technisch überhaupt möglich ist, sollte prioritär beantwortet werden.“** [4].

Anforderungen an die Materialien

Welche Materialien eignen sich zum Bau von Fusionskraftwerken?

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag hat unlängst diese Frage hervorragend mit folgenden Punkten zusammenfassend beantwortet [4]:

- 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.

Kann man die Auswirkungen der Neutronen auf die im Fusionsreaktor verwendeten Materialien schon genügend gut voraussagen?

Nein! Die Kernfusion produziert verglichen mit der Kernspaltung (1 MeV) mehr schnelle Neutronen mit einer kinetischen Energie von 14 MeV und mit einem anderen Energiespektrum.

Veränderung der Struktur durch Verdrängung

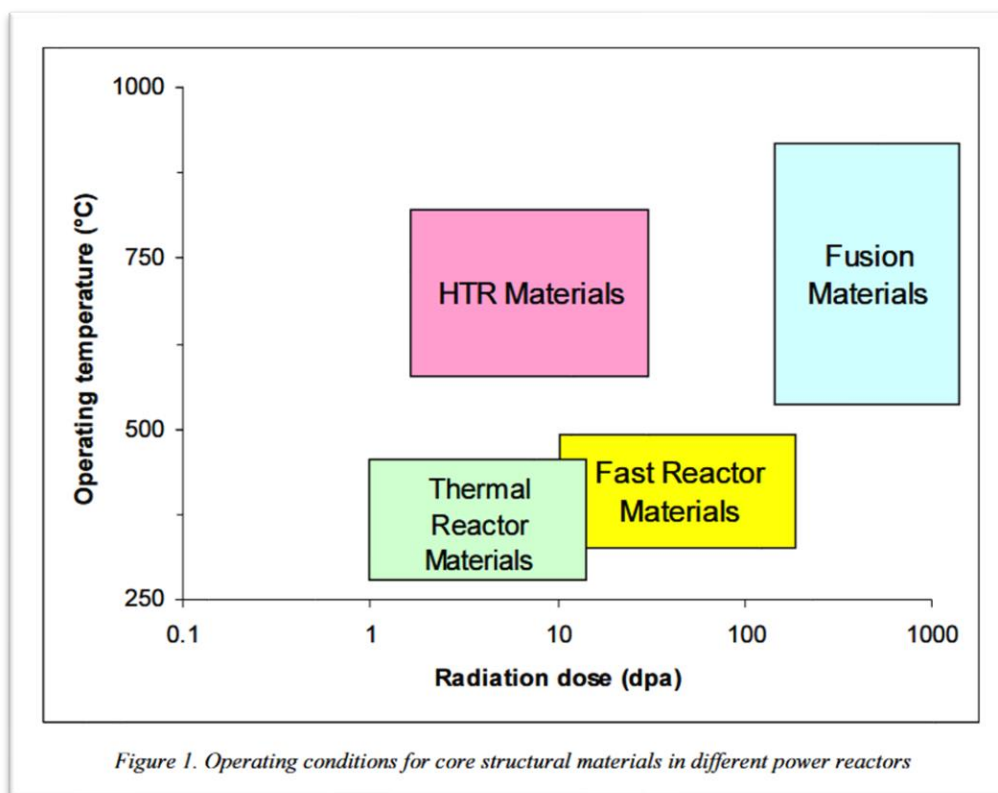


Abbildung 4: Betriebsbedingungen für Materialien der Core-Struktur in verschiedenen Leistungsreaktoren; Entnommen aus [40]

Die Wechselwirkung dieser Neutronen verursacht größere und anders geartete Materialschäden als in Kernreaktoren. Als Einheit für diesen physikalischen Effekt, dass Atome aus ihren Gitterpositionen verdrängt werden, nutzt man dpa (displacement per atom).

Es gibt angeblich bisher keine realitätsnahe experimentelle Untersuchungsmöglichkeit und auch ITER soll dafür nicht geeignet sein. Bei ITER rechnet man mit nur ca. 1 dpa / Lebenszeit und bei DEMO mit ca. 20 dpa/ Jahr [37]. Die Schätzungen für einen realistischen Fusionsreaktor differieren zwischen 30 dpa / Jahr [38] bis zu 475 dpa/ 5 Jahre also knapp 100 dpa / Jahr [39], [40] (siehe Abbildung 4). Was erwartet man, wenn jedes Atom in seinem Gitter bis zu 100 mal im Jahr seinen Platz verschoben wird? Damit versprechen eigentlich alle Materialien und die ursprünglichen Materialeigenschaften gehen verloren.

Veränderung der Struktur durch Neutronenaktivierung

Neben den Verdrängungsprozessen können auch Kernreaktionen durch die Neutronenaktivierung eintreten. So findet man z.B., dass im Stahl das Eisen mit den Neutronen reagieren kann und dabei Wasserstoff und Helium erzeugt werden. Das führt ebenfalls zu erheblichen Materialschäden [41].

Eigentlich weiß man zu wenig

Aus diesem Grund will man zur Simulation eine Materialtestanlage [↗IFMIF-DONES](#) in Granada/Spanien bauen. Unklar ist, warum man dafür nicht vorhandene Beschleuniger z.B. am ZERN nutzen kann?

Also hofft man heute, dass die bekannten Materialien dem zukünftigen [↗„harten Neutronenbombardement“](#) auch für die geplanten Betriebszyklen standhalten. Oder man muss wieder andere Materialien mit ggf. anderen Verunreinigungen entwickeln, die wiederum Einfluss auf das Abfallmanagement haben werden ... ein Kreislauf ohne Ende.

Gibt es Anforderungen an die Reinheit des Stahls, der in Fusionskraftwerken eingesetzt werden soll?

Für den Bau von Fusionskraftwerken wie ITER sind erhebliche Mengen an Baumaterialien erforderlich, darunter auch große Mengen an Stahl. ITER selbst benötigt etwa [↗23000 Tonnen](#) Stahl. Etwa 20 bis 30 % des gesamten Stahls in einem Fusionskraftwerk wird intensiver Neutronenstrahlung ausgesetzt. Verunreinigungen des Stahls können dabei durch Neutroneneinfang aktiviert werden. Diese aus den Verunreinigungen entstandenen Isotope bestimmen dann maßgeblich das später anzuwendende Abfallmanagement. Da die Radioaktivität nicht oberflächlich auf dem Stahl sitzt, helfen dann auch keine Dekontaminationsmaßnahmen.

EUROFER97 ist ein europäischer Stahl, bei dem radiologisch unerwünschte Elemente wie Mo, Nb, Ni und Co durch ihre weniger zu aktivierenden Gegenstücke wie Ta, W, Mn und V ersetzt wurden. So muss z.B. der Gehalt des Schwermetalls [↗Niob](#) (Nb) aus heutiger Sicht unter 1 ppm gehalten werden [42].

Table 3. Specification of chemical composition and allowable impurity concentration of EUROFER97 (wt%) [89].

Element	wt%	Element	wt%	Element	wt%
C	0.09–0.12	As + Sn + Sb + Zr	0.00–0.05	Mo	<0.005
Cr	8.50–9.50	S	<0.005	Nb	<0.005
W	1.0–1.2	B	<0.002	Co	<0.01
Mn	0.20–0.60	Si	<0.050	P	<0.005
V	0.15–0.25	Al	<0.01	Ti	<0.02
Ta	0.10–0.14	Cu	<0.01	Fe	Balance
N	0.015–0.045	Ni	<0.01		

Abbildung 5: Spezifikation der Grenzwerte für Verunreinigungen in EUROFER97; Entnommen aus [42]

Achtung: Die obige Tabelle (Abbildung 5) wurde im Jahr 2022 in [42] verwendet, zitiert aber eine Quelle aus dem Jahr 2019. Wahrscheinlich galt im Jahr 2019 für Nb ein Grenzwert von 50 ppm. Nach den Autoren soll im Jahr 2022 aber Nb schon 1 ppm unterschreiten. Falls dies kein redaktioneller Fehler in [14] war, dann sehen wir, dass die Anforderungen an den Stahl sehr dynamisch sind. Was heute von Fusionsforschern als gut befunden wird, könnte morgen schon nicht mehr stimmen.

Weiterhin sollte man wissen, dass sich die Anforderungen für das Abfallmanagement aus den Anforderungen nach dem sogenannten 10 μ Sv Konzept ergeben, nach dem über die \nearrow “Freigabe” radioaktiv belastetes Material wieder in die Stoffkreisläufe zurückgeführt werden soll. \nearrow Umweltverbände lehnen dieses Vorgehen jedoch prinzipiell ab.

Eine weitere Schwäche des obigen Denkansatzes erkennt man an der Feststellung auf dem IAEA Workshop “Entsorgungskonzept” (Ende 2019) [42], dass für relevante Isotope (^{10}Be , ^{26}Al , ^{32}Si , $^{91,92}\text{Nb}$, ^{98}Tc , $^{113\text{m}}\text{Cd}$, $^{121\text{m}}\text{Sn}$, ^{150}Eu , $^{157,158}\text{Tb}$, $^{163,166\text{m}}\text{Ho}$, $^{178\text{n}}\text{Hf}$, $^{186\text{m},187}\text{Re}$, ^{193}Pt , $^{208,210\text{m},212}\text{Bi}$, ^{209}Po) IAEA Empfehlungen für Freigabewerte fehlen und das schon mehr als ein Jahrzehnt [43]. Somit sind unter Umständen die heutigen Anforderungen an die Reinheit des Stahls ungenügend.

Gibt es Anforderungen an die Reinheit des Berylliums, das in Fusionskraftwerken eingesetzt werden soll?

\nearrow Beryllium spielt im Fusionsreaktor eine wichtige Rolle, hauptsächlich in der ersten Wand des Reaktors, die das Plasma umgibt. Diese Wand muss extremen Temperaturen und Neutronenbeschuss standhalten. Beryllium ist ein effizienter Neutronenmoderator, da es die schnellen Neutronen, die während der Fusionsreaktion entstehen, verlangsamen kann und Beryllium relativ unempfindlich gegenüber Neutronenaktivierung ist. Neben dieser vielen für den Kernphysiker vorteilhaften Eigenschaften, ist Beryllium jedoch toxisch (Siehe auch: „Ist Beryllium harmlos?“).

Und Beryllium gibt es auch nur mit Verunreinigungen von Transuranen. Nimmt man z.B. an, dass in einem Fusionskraftwerk 300 bis 400 t Beryllium mit 20 bis 100 ppm Uran verbaut worden sind, dann sind es in Summe immerhin 6 bis 40 kg Uran, die einem enormen Neutronenbeschuss ausgesetzt sind. Somit ist bei der Aufarbeitung des Berylliums nicht nur das enthaltene Tritium relevant, sondern auch die Aktivierungsprodukte der Verunreinigungen mit sehr langen Halbwertszeiten [42]. Im Jahr

2023 hat man sich im [ITER Projekt](#) entschieden, anstelle von Beryllium Wolfram zu verwenden.

Aus einer Konzeptstudie zum Umgang mit aktiviertem Beryllium weiß man, dass international keine Erfahrung zur Endlagerung von Beryllium vorliegen [44]. Ob die Fusionsforscher bei der Auswahl von Wolfram auch den Aspekt der Endlagerung im Auge hatten, bleibt für die Autoren dieser FAQs offen.

Wartungszyklen

Stimmt es, dass Fusionskraftwerke in regelmäßigen Abständen Wartungszyklen brauchen und dann keinen Strom produzieren?

In Fusionsreaktoren werden Materialien extrem hohen Belastungen (Temperatur, extremes Vakuum, intensive Neutronenstrahlung) ausgesetzt. Dies kann die Struktur der Materialien verändern, was zu einer Materialversprödung führt (siehe Seite 22). Da man dies weiß, müssen realistische Wartungszyklen definiert werden. Das Wartungsschema in der folgenden Abbildung 6 stammt aus dem Jahr 2005 [45].

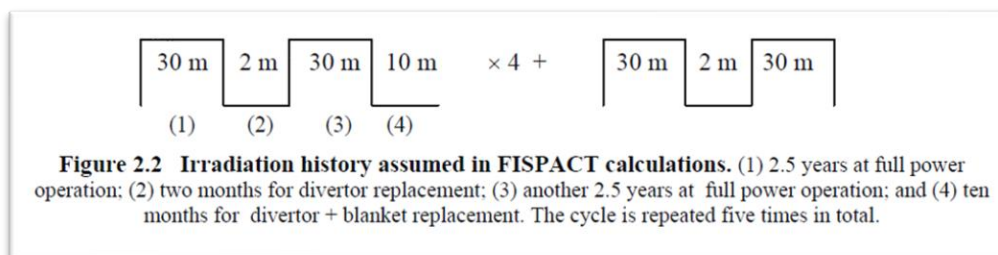


Abbildung 6: Wartungszyklen entsprechend der „European Fusion Power Plant Conceptual Study (PPCS)“; Entnommen aus [45]

Ja, und es stimmt, dass in diesen Wartungsperioden ein Fusionskraftwerk keinen Strom produziert. D.h. man müsste in ein stand-by Kraftwerk investieren, das den Ausfall des zu wartenden Grundlastkraftwerkes über 2 Monate und bzw. 10 Monate abdeckt.

Stimmt es, dass man in den Wartungszyklen hoch radioaktive Teile erneuern muss und dies nur mit Automaten machbar ist?

Wer glaubt, dass später Menschen in Fusionsreaktoren herumschrauben können wie in Abbildung 7, der irrt mächtig. Bei der Aufarbeitung von radioaktiven Materialien von Fusionsreaktoren muss man mit Strahlungen bis zu 10000 Sv/h wegen der Tritiumgehalte rechnen [45]. Und dies trifft sowohl auf die während der Wartung auszubauenden Teile, aber auch auf den Rückbau des Fusionskraftwerkes zu.



Abbildung 7: Final assembly work in November 2021 on the plasma vessel of Wendelstein 7-X in Greifswald, Germany; Foto: MPI for Plasma Physics / Jan Hosan
 ↗ <https://euro-fusion.org/services/media-library/>

Wegen dieser extrem hohen Strahlung können NUR ferngelenkte Systeme zum Abbau der auszutauschenden Teile eingesetzt werden. Übrigens gibt man sich in dem „Final Report of the European Fusion Power Plant Conceptual Study (PPCS)“ der Illusion hin, dass man die gesamte Aufarbeitung des radioaktiven Abfalls von einem Fusionsreaktor in weniger als einem Jahr mit diesen ferngelenkten Systemen schaffen würde [45]. Das ist fern ab von der Realität, vergleicht man mit den notwendigen ↗10 bis 15 Jahren zum Rückbau von Kernkraftwerken und den größeren Abfallmengen bei Fusionsreaktoren (siehe Seite 36).

Der Tritiumgehalt in den verschiedenen Abfallarten ist ein Schlüsselparameter für die Auswahl des Abfallbehandlungsverfahrens sowie für die Annahmekriterien für Endlager.

7. Umwelt Aspekte

Nachhaltigkeit

Gibt es eine umfassende Nachhaltigkeitsanalyse für die geplanten Fusionskraftwerke?

Höchstwahrscheinlich nicht. Und falls jemand solch eine umfassende Nachhaltigkeitsanalyse in Auftrag geben sollte, dann müsste man als Gradmesser die Definition des Begriffs “Nachhaltigkeit” aus dem ↗Brundtland-Bericht verwenden (siehe Seite 8).

Die Nachhaltigkeit von Fusionskraftwerken unter dieser Definition erfordert eine gründlichere Betrachtung aller Phasen der geplanten Fusionskraftwerke über die gesamte Lebensdauer einschließlich Bau , Betrieb , Stilllegung, Rückbau, Recycling und Endlagerung sowie bezüglich des Ressourcenverbrauchs und der Langzeitfolgen für Umwelt und Gesellschaft.

Wie beeinflussen Energien aus "nicht erneuerbaren Quellen" die Oberflächentemperatur der Erde?

Energiequellen aus nicht erneuerbaren Quellen sind vor allem:

- Energie aus fossilen Energiequellen (Erdöl, Erdgas)
- Energie (Strom + Abwärme) aus der Kernspaltung
- Energie (Strom + Abwärme) aus der Kernfusion
- aber auch Geothermie mit der Nutzung von Wärme aus tieferen Erdschichten.

Unabhängig von dem CO₂ Ausstoß haben diese Energien einen Einfluss auf die Oberflächentemperatur der Erde, heute einen geringen zu vernachlässigenden Anteil, der aber bei ungebremstem Wachstum des globalen Primärenergiebedarf immer stärker wird. Dieser Zusammenhang wird unter der Frage "Was versteht man unter dem Begriff "physikalische Grenzen des Wachstums" in Bezug auf den zukünftigen Energiebedarf der Erde?" näher dargestellt.

Kühlung und Wasserverbrauch

Warum brauchen Fusionskraftwerke so viel Wasser im Betrieb?

Die Kernfusion ist nicht so innovativ, wie sie sich anhört. Letztendlich basiert die Stromproduktion auch nur auf einer Dampfmaschine. Und deren Wirkungsgrad ist am höchsten, wenn die Temperaturdifferenzen zwischen dem erzeugten Wasserdampf und dem abgekühlten Dampf sehr hoch sind ([↑Carnot-Wirkungsgrad](#)). Zur Kühlung braucht man Kühltürme und viel Wasser, so wie Kohlekraftwerke oder auch Atomkraftwerke.

Was passiert mit der vielen Abwärme aus den geplanten Fusionskraftwerken?

Etwa 60-70% der Fusionsenergie würden als Abwärme anfallen, die nicht direkt in Strom umgewandelt werden kann. Aber man darf nicht vergessen, dass sämtliche genutzte Energie letztlich als Wärme in die Umwelt zurückkehrt, sei es durch direkte Abwärme oder durch den Endverbrauch von Elektrizität. Dadurch wird das Thema "thermische Umweltverschmutzung" viel umfassender, als es in vielen Energie-Debatten dargestellt wird.

Nun zurück zur "Abwärme" von Fusionskraftwerken. Ähnlich wie bei anderen Kraftwerken müsste man versuchen,

- zumindest einen Teil der Abwärme naheliegenden Nutzern zur Verfügung zu stellen. Doch bei zentralen Großkraftwerken ist solch eine Nutzung begrenzt.
- Die häufigste Methode wird jedoch wieder die Abführung der Abwärme durch Kühltürme in die Atmosphäre, bzw. in Flüsse oder Meere sein.

Und man weiß, dass für die Kühlung immense Mengen Wasser benötigt werden. Man schätzt, dass man für eine 1 GW Leistung bei direkter Durchlaufkühlung (Fluss, See oder Ozean) im Jahr etwa 1,4 bis 2,4 Milliarden m³ Kühlwasser benötigt. Bei einer Verdunstungskühlung über Kühltürme benötigt man zwar weniger Wasser, aber es sind immer noch 1 bis 1,5 Millionen m³ pro Jahr.

Wer die Nachrichten verfolgt, wird wissen, dass Frankreich mit seinen vielen Kernkraftwerken, diese bei extremer Hitze oder Wassermangel in den Flüssen drosseln oder herunterfahren müssen. Das wirft die interessante Frage auf: Wäre ein

Fusionskraftwerk überhaupt in seiner Leistung regelbar? (Siehe auch: „Könnte man Fusionskraftwerke leicht, entsprechend der aktuellen Stromnachfrage im Stromnetz, regeln?“)

Emissionen/ Strahlenschutz

Welche radioaktiven Emissionen werden über Abluft und Abwasser in dem Regelbetrieb von Fusionskraftwerken erwartet?

Es gibt einen Bericht „Untersuchung der Sicherheit von Kernfusionskraftwerken hinsichtlich nuklearer Stör- und Unfälle“, der eben nur auslegungsüberschreitende Ereignisse thematisiert [46]. Ein adäquater Bericht zu den erwarteten Emissionen im Regelbetrieb ist nicht bekannt.

In verschiedenen Arbeiten wird pauschal eine jährliche Emission von 1 g Tritium / 0,5 GW angenommen [47], [48]. Für ITER wurden ohne Quellenangabe 0,6 g Tritium im Normalbetrieb und 1,8 g Tritium / Jahr für Wartungszeiten angegeben [48].

Die [„Deutsche Physikalische Gesellschaft“](#) berichtet allerdings: „Im Normalbetrieb rechnet man bei einem Fusionsreaktor mit der Freisetzung von etwa 2 g Tritium pro Jahr durch Leckage und Diffusion.“ Unklar ist, auf welche Leistung sich diese 2 g pro Jahr beziehen.

Der von Larsen und Babineau in der Publikation „An Evaluation of the Global Effects of Tritium Emissions from Nuclear Fusion Power“ [48] gemachte Ansatz schaut dabei nicht nur auf einen Fusionsreaktor, sondern hinterfragt die nicht näher untersuchten Umweltauswirkungen einer neuen, jedoch breit angewendeten Technologie. Die Autoren wiesen eine stetige Zunahme von Tritium in verschiedenen Kompartimenten der Umwelt über ihr Modell nach.

Wenn man etwas über die Verteilung von Tritium in den Umweltkompartimenten wissen will, sollte man auf die langjährigen Untersuchungen in Kanada schauen. In Abbildung 8 ist die jährliche durchschnittliche Konzentration von Tritium in der Luft für die Jahre 1985–1999 in Abhängigkeit von der Entfernung zu Atomkraftwerken dargestellt [49]. Zu beachten ist, dass in der Nähe der Atomkraftwerke eine 100 fache Tritium Konzentration in der Luft nachgewiesen worden ist gegenüber einer Entfernung von 40 Kilometern.

Noch erschreckender ist die Anreicherung von Tritium über 3 Zehnerpotenzen in Umweltkompartimenten (Boden, Pflanzen, Nahrungsmittel) in Abhängigkeit von der Entfernung zum nächsten Atomreaktor (Abbildung 9) [49].

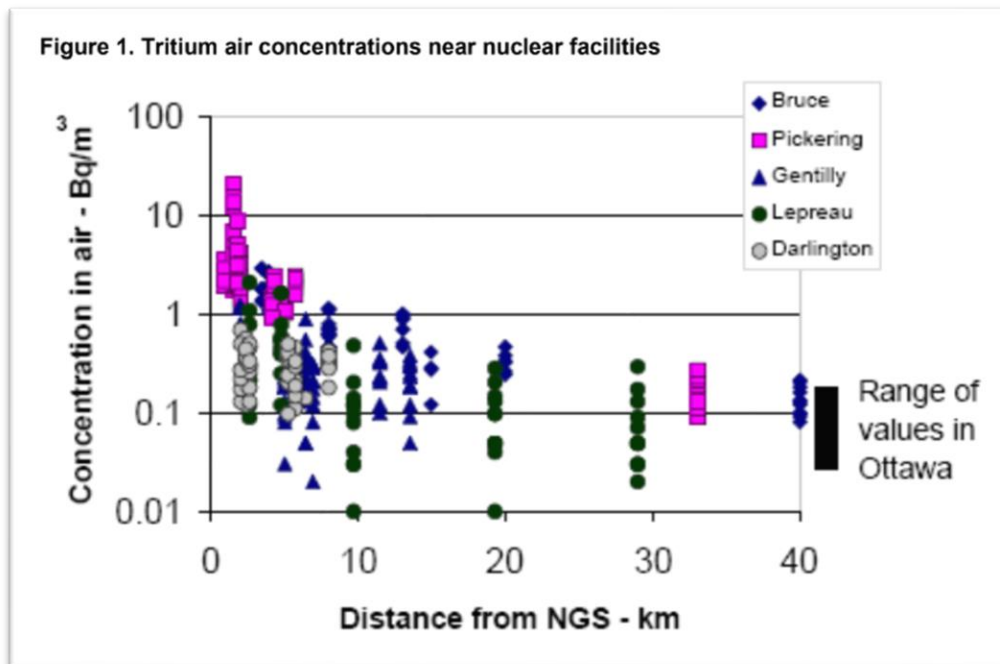


Abbildung 8: Tritium air concentrations near Canadian nuclear facilities;
Entnommen aus [49]

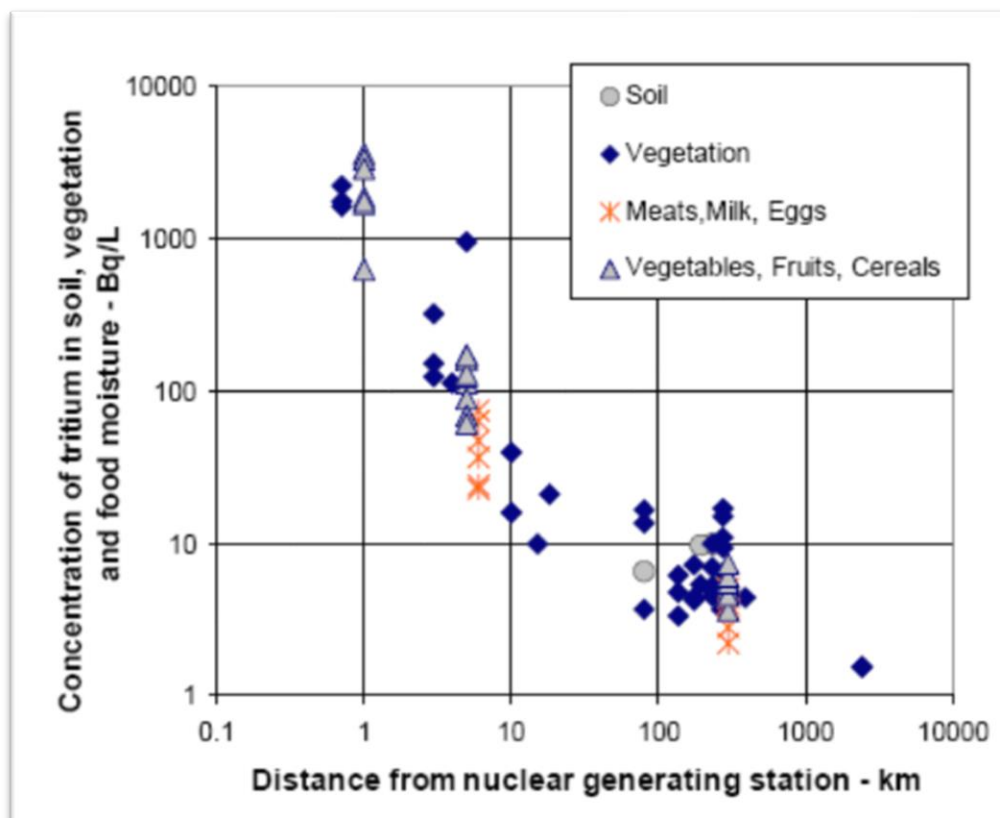


Abbildung 9: Tritium concentrations in foodstuffs near Canadian nuclear facilities;
Entnommen aus [49].

An dieser Stelle müsste man auf die Kinderkrebsstudie in der Nähe von deutschen Atomkraftwerken [KIKK](#) verweisen. Die Studie hat nachgewiesen, dass es einen signifikanten Zusammenhang gibt zwischen der Nähe der Wohnung zum Kernkraftwerk zum Zeitpunkt der Diagnose und dem Risiko, vor dem fünften Geburtstag an Krebs beziehungsweise Leukämie zu erkranken. Offiziell wird ein kausaler Zusammenhang aber abgestritten.

Auch wenn Physiker vielleicht einmal stolz sein werden, falls es je einen funktionsfähigen Fusionsreaktor geben wird, sollte man sich rechtzeitig über die Langzeitfolgen Gedanken machen.

Die Natur verzeiht nicht menschliche Eingriffe in Stoff- und Energiekreisläufe. Sie hat ein Gedächtnis für nicht nachhaltige Technologien. Und erst dann würden die Menschen nachträglich beginnen, mehr über die tatsächlichen radiologischen Wirkungen von Tritium im menschlichen Organismus in Erfahrung bringen zu wollen.

Gibt es Verfahren zur Reinigung der Abluft bzw. des Abwassers, um die Gehalte an Tritium zu senken?

Nein! Es gibt kein Verfahren, mit dem man die Abluft oder das Abwasser von Tritium in den Formen T_2 , HT, HTO, T_2O mit einem vertretbaren Aufwand reinigen kann, heißt es in dem Jahresbericht ["Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung 2020"](#). Deshalb werden die Tritium-Emissionswerte auf das technisch unvermeidbare Maß durch die Behörden festgesetzt.

Die künstlich freigesetzte Radioaktivität wird weltweit über das "Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP)" erfasst. Die Monitoring-Daten haben jedoch noch keine Rückwirkungen auf die Zulassung von kerntechnischen Anlagen. Das heißt im Umkehrschluss, dass die Sicherheitsbarrieren bei zukünftigen Fusionsreaktoren bestmöglich auszulegen sind, um die negativen Auswirkungen des Tritiums nach dem [ALARA Prinzip](#) zu minimieren.

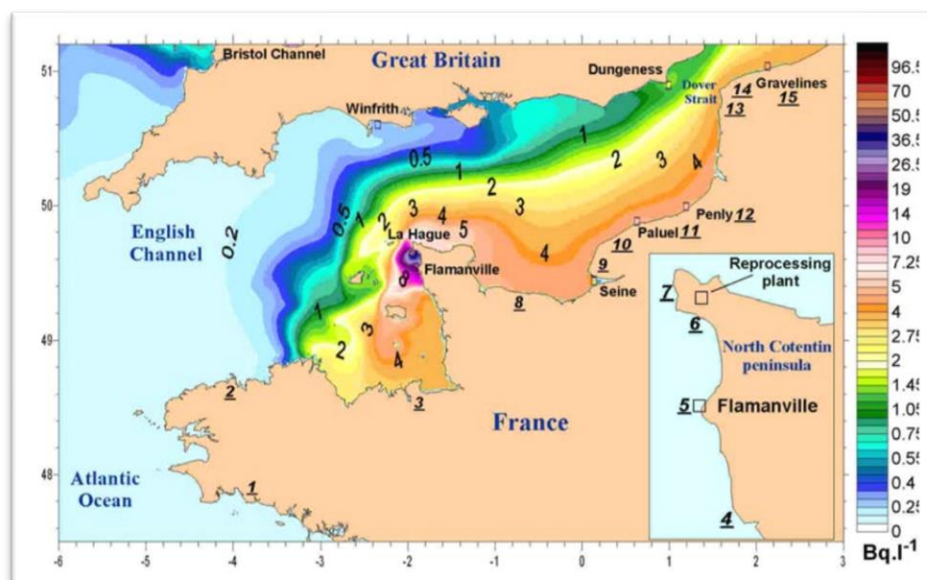


Abbildung 10: Figure 2. Chart of the average tritium concentrations in seawater in the English Channel, in 2001-2002, calculated using the TRANSMER model considering the releases from all the nuclear plants on the French and English coast; Entnommen aus [50]

Beeindruckend ist es zu sehen, welchen Grad an Umweltverschmutzung mit Tritium man durch die am Ärmelkanal angesiedelten Atomkraftwerke und Atomaufbereitungsanlagen erreicht hat (siehe Abbildung 10) [50]. Beim Ansehen dieser Abbildung sollte man sich dabei bewusst machen, dass man in dem UNSCEAR 2016 Bericht [51] noch offenen Forschungsbedarf zur Radiotoxizität von Tritium festgestellt hat (Siehe auch: „Ist die Radiotoxizität von Tritium hinreichend bekannt?“)

Welche Strahlenschutzvorkehrungen müssen zum Schutz der Beschäftigten getroffen werden?

In der Studie von 2005 “Final Report of the European Fusion Power Plant Conceptual Study (PPCS)” hatte man geschrieben, dass man in dem Stadium der Konzeptphase nur eine grobe Abschätzung der potenziellen Dosisbelastung der Beschäftigten bei normalen Wartungstätigkeiten vornehmen konnte. Man schätzte ab, dass die Vakuumpumpensysteme das Potenzial haben, den größten Beitrag zur Strahlenbelastung der Beschäftigten zu leisten. Diese Systeme sollen für mehr als die Hälfte der Gesamtdosis verantwortlich sein [45].

Versteht man unter Wartungsarbeiten jedoch den zyklischen Austausch von Komponenten, dann ist der Mensch fehl am Platz. Das wird nur durch ferngelenkte Systeme zu machen sein. Z.B. erwartet man eine Gammastrahlung von ca.10000 Sv/h an der inneren Wand des Fusionsreaktors. Diese Systeme müssen für solch eine hohe Strahlung ausgelegt sein [52] (siehe Seite 25).

Tritium

Welche Gefahren sind beim Transport von Tritium zu bedenken?

Es ist bekannt, dass man zum Starten eines Fusionsreaktors extern geliefertes Tritium benötigt. In der ITER Dokumentation [53] geht man von einem Tritium-Inventar von 1,7 kg aus, bei größeren Reaktoren wird es entsprechend mehr sein. Solch ein Start-Inventar müsste erst einmal sicher angeliefert werden! Da ITER selbst kein Tritium erbrüten kann, ist ITER von einer externen Tritiumversorgung abhängig (etwa 18 kg während der gesamten Betriebsdauer) [54].

In dem “Final Report of the European Fusion Power Plant Conceptual Study (PPCS)” aus dem Jahr 2005 hieß es, dass Kanada Transportcontainer für jeweils nur 50 g Tritium lizenziert hat [45]. Im Jahr 2018 fasste ein Artikel sehr umfassend die zukünftigen Kapazitäten zur Produktion von Tritium, die zeitliche Entwicklung des Bedarfs und die Sicherheitsanforderungen an die Transportbehälter für Tritium zusammen [54].

Ist die Radiotoxizität von Tritium hinreichend bekannt?

Nein! Tritium ist wahrscheinlich ein in seiner radiotoxikologischen Wirkung unterschätztes Isotop. Der UNSCEAR Bericht von 2016, der in einer separaten Anlage auf über 120 Seiten Studien zum Isotop Tritium ausgewertet hat, empfiehlt wegen der möglichen Nutzung in Fusionsreaktoren und der Anreicherung von Tritium in der Umwelt und in der Lebensmittelkette, vor allem den organisch gebundenen Anteil von Tritium näher zu verfolgen [51].

Weiterhin erkennt der UNSCEAR2016 Bericht an, dass die meisten experimentellen Studien zu Tritium vor 20 bis 30 Jahren durchgeführt wurden. Der Bericht empfiehlt die Anwendung von modernen Analysemethoden, insbesondere bei Studien an Föten und Embryonen sowie bei Analysen von DNA-Schäden [51]. Im UNSCEAR2016

Bericht wurde jedoch kein „empfindlichster Endpunkt“ für Tritium benannt, auf dem die Risikobewertung aufzubauen ist. Es scheint, als ob das Wissen der Menschen zu Tritium zu ungenau ist, um daraus eine realistische und den Gefahren angemessene Risikobewertung abzuleiten. Eigentlich müssten wegen dieser schlechten Datenlage erhebliche zusätzliche Sicherheitsfaktoren aufgeschlagen werden.

Es gibt mehrere Gründe für diese schlechte Datenlage:

- Das Isotop lässt sich nur schwer in Umwelt-Kompartimenten messen.
- Bei Personendosimetern wird Tritium nicht erfasst.
- Tritium wird als Wasserstoff-Isotop in den Stoffwechsel mit einbezogen. Damit kann die relativ energiearme Strahlung dennoch in den Zellen biologische Wirkungen erzeugen.

Im März 2020 hat der als unabhängiger Experte tätige britische Strahlenbiologe Ian Fairlie eine umfangreiche Bewertung von Tritium im Internet veröffentlicht [55]. Fairlie trat schon 2007 als Gutachter für Greenpeace in Bezug auf Tritium in Kanada auf [56].

Folgende Gedanken sind aus seiner Zusammenstellung hervorzuheben [55]:

- Insgesamt stellt Tritium die konventionelle Dosimetrie und die Bewertung des Gesundheitsrisikos vor zahlreiche Herausforderungen.
- Er weist auf eine Unterschätzung der Inkorporation von Tritium über die Luft hin, da nach seinen Analysen die individuellen und die kollektiven Dosen über die Luftemission viel größer als über das Wasser sind.
- Er plädiert bei der Risikobewertung von diesem Isotop für die Verwendung des Begriffs „Radioaktivität“ anstelle von „Strahlung“. Mit anderen Worten sollte man die Aktivität in Bq für die Emissionen, die Aufnahmen und die Konzentrationen von Tritium anstelle der Sv-Dosen verwenden. Die Aktivität kann physikalisch gemessen werden, während Strahlendosen nur Schätzungen sind.
- Er plädiert auf der Grundlage der Kanadischen Daten (Ontario Drinking Water Advisory Council's - ODWAC) für einen Trinkwassergrenzwert von 20 Bq/L.
- Er formuliert die Hypothese, dass Tritium die Ursache für die beobachteten Anstiege von Leukämien von Kindern, die in der Nähe von Kernreaktoren geboren wurden, ist.
- Er empfiehlt Frauen, die in der Nähe von Kernkraftwerken wohnen und die eine Familie mit Kindern gründen wollen bzw. Familien mit kleinen Kindern nahezu-legen, den Wohnort zu wechseln!
- Er formuliert sehr deutlich, dass bei der Interpretation von epidemiologischen Studien zu Tritium in der Nähe von Kernreaktoren, „versteckte Vorurteile zugunsten der Atomkraft“ im Spiel waren. Er nannte es „Befangenhheitskonflikte“.
- Viele epidemiologische Studien in der Nähe von Kernreaktoren haben erhöhte Risiken festgestellt, die jedoch statistisch als „nicht signifikant“ abgetan wurden. Doch dieses statistische Fachwort „signifikant“ bedeutet nur, dass der beobachtete Effekt mit einer 5 %igen Irrtumswahrscheinlichkeit zufällig eingetreten sein kann. Würde man eine 10 %ige Irrtumswahrscheinlichkeit zulassen, wäre der beobachtete Effekt statistisch signifikant.

Mit obigen Fragen und Empfehlungen im Hinterkopf sollte man überlegen, warum die Menschen das Risiko auf sich nehmen wollen, das Isotop Tritium in solch hohen Mengen tatsächlich einsetzen zu wollen.

Warum unterscheiden sich die national festgesetzten Trinkwassergrenzwerte für Tritium um Zehnerpotenzen?

Da die Radiotoxizität von Tritium sehr unterschiedlich bewertet wird, gibt es weltweit auch sehr große Unterschiede in der Festlegung von Trinkwassergrenzwerten für dieses Isotop. ↗[Kanada](#) hat einen internationalen Vergleich im Jahr 2023 veröffentlicht.

Tabelle 1: Vergleich von Trinkwassergrenzwerten für Tritium (entnommen aus [57])

Country / Organization	Tritium limit for drinking water (Bq/L)
Finland	30000
WHO	10000
Switzerland	10000
Russia	7700
Canada (Ontario)	7000
United States	740
European Union not a limit, but rather as a screening value	100
Ontario Drinking Water Advisory Council proposed limits	20
California Public Health Goal (PHG not enforceable)	14,8

Die Ableitung des kalifornischen Wertes für die Zielgröße PHG von 400 pCi/L = 14,8 Bq/L im Trinkwasser kann man im Bericht der ↗[OEHHA](#) von 2006 nachvollziehen [58].

Kann man Tritium mit einem Personendosimeter erfassen?

Nein! Die im Rahmen des Strahlenschutzes eingesetzten ↗[Personendosimeter](#) können in der Regel nicht die ↗[schwache beta-Strahlung des Tritiums](#) erfassen.

Wie bestimmt man Tritium in Umweltkompartimenten?

Die Bestimmung von Tritium in Umweltkompartimenten ist sehr aufwändig. Dabei ist es entscheidend, ob man nur das als titriertes Wasser vorliegende Tritium (HTO) oder auch den organisch gebundenen Anteil (↗[OBT](#)) erfassen will. Die Methoden basieren meist auf einer Messung an einem ↗[Flüssigkeitsszintillationsspektrometer](#) (LSC).

Die Methodenbeschreibung ↗["Verfahren zur Bestimmung der Aktivitätskonzentration von Tritium im Abwasser"](#) könnte als Beispiel für die Messung in wässrigen Medien dienen. Wenn man Tritium in wasserhaltigen Umweltkompartimenten (Nahrungsmittel, Pflanzen, Organproben) messen will, muss man beide Anteile HTO und OBT getrennt messen. Die Methode ↗["Überwachung der Tritiumaktivität in Pflanzen"](#) basiert z.B. auf der Gefriertrocknung, wobei im gefrorenen Kondensat sich das HTO befindet. Der getrocknete Rest wird oxidiert und damit das organisch gebundene Tritium in das HTO überführt und als solches dann gemessen.

Beryllium

Ist Beryllium harmlos?

ITER benötigt eine erhebliche Menge an Beryllium für die Wandstrukturen, zumindest war dies der ursprüngliche Plan. Man schätzte den Bedarf für diesen Reaktor in der

Größenordnung von mehreren hundert Tonnen. Man möchte meinen, dass ein Stoff, der in solchen Mengen in einer Anlage Verwendung findet, harmlos sein sollte.

Dem ist leider nicht so:

- “Gemäß der von der Europäischen Union genehmigten harmonisierten Einstufung und Kennzeichnung ist dieser Stoff tödlich beim Einatmen, giftig beim Verschlucken, kann Krebs beim Einatmen verursachen, schädigt die Organe bei längerer oder wiederholter Exposition, verursacht schwere Augenreizungen, verursacht Hautreizungen, kann eine allergische Hautreaktion verursachen und kann die Atemwege reizen.” ([↗CLP-Verzeichnis](#))
- Nur wenige Elemente des Periodensystems wurden in der Chemie so “stiefmütterlich” erforscht, wie die von Beryllium [59]. Trotzdem wird es von Fusionsforschern gerne eingesetzt, obwohl man die physikalischen, chemischen und toxikologischen Eigenschaften von Berylliumverbindungen nur ungenau kennt.
- Die maximal einlagerbare Masse an grundwassergefährdendem Beryllium beträgt gemäß der Endlagerbedingungen von Schacht Konrad 24,5 kg [44]. Übrigens geht man bei Endlagerbehältern davon aus, dass diese irgendwann korrodieren. Wenn man in einer Studie Forschungsarbeiten zu einer Reihe von physikalischen, chemischen und toxikologischen Eigenschaften von Beryllium angeregt, dann scheint die Endlagerfähigkeit von metallischem Beryllium bzw. Beryllium-haltigen Abfällen noch unklar zu sein [44].

Laut einer wissenschaftlichen Arbeit aus dem Jahr 2024 wird metallisches Beryllium in einem Endlager, eingebettet in Beton, bei stark alkalischem Milieu in Lösung gehen [60].

Metallschmelzen

Stimmt es, dass man u.a. auch Metallschmelzen zur Kühlung vorsehen hat?

In manchen Reaktor Konzepten wird im Blanket eine Metall-Schmelze vorgeschlagen z.B. eine eutektische Legierung aus Blei (Pb) und Lithium (Li) mit einem spezifischen Mischungsverhältnis von 17 % Lithium (siehe Seite 21). Wenn man liest, dass solch eine Schmelze zwischen 460 °C und 700 °C im System im Konzept C mit einer Fließgeschwindigkeit von 46000 kg/s (d.h. 46 Tonnen/ Sekunde) umher gepumpt wird, dann sollte man den Fall des Bruches einer Leitung oder der Pumpe als Störfall-Szenario untersuchen [45].

Alternativ zur Metallschmelze von Pb-Li gab es auch Konzept-Ansätze mit einer Na-Li Schmelze im Blanket. Ein solches System würde den Vorteil der niedrigeren Schmelztemperatur und einer geringeren Dichte der Schmelzen haben. In einem solchen Konzept wären dann aber auch die hohe Brandgefahr von Natrium bei Kontakt mit Wasser oder Luft zu beachten.

Radioaktiver Abfall

Auf welchem Konzept basiert der Umgang mit dem radioaktiven Abfall?

Es heißt, das sogenannte 10 µSv Konzept soll die Basis darstellen. Von vielen namhaften Organisationen und Persönlichkeiten wird diese Basis jedoch angezweifelt, z.B.

der BUND [61] und die [IIPPNW](#). In einer Stellungnahme des Ökoinstitutes wird die Ableitung des Grenzwertes von 10 μSv erläutert und begründet [62]:

„Das Konzept basiert auf dem allgemeinen Rechtsprinzip, nach dem Bagatellen nicht in einer Norm geregelt werden („de minimis non curat lex“ – das Gesetz kümmert sich nicht um Kleinigkeiten). Das Konzept wurde von der Internationalen Atomenergieorganisation 1988 in seiner noch heute international praktizierten Form formuliert. Als Risiko, das keiner Regulierung mehr bedarf, wird im 10 μSv -Konzept ein jährliches individuelles Risiko in der Größenordnung von 1:10 Mio. pro Jahr angesehen. Mit international üblichen Risikokoeffizienten (insbesondere dem „Detriment“ der Internationalen Strahlenschutzkommission ICRP) ergibt sich daraus eine Begrenzung der Dosis auf ‘einige’ 10 μSv im Jahr“.

Was sind markante Schwachstellen des 10 μSv Konzeptes?

In Deutschland soll die [Strahlenschutzverordnung](#) die Einhaltung des 10 μSv Konzeptes regeln. Darin befindet sich die Tabelle 1 mit den Isotopen-spezifischen „Freigrenzen, Freigabewerte für verschiedene Freigabearten, Werte der Oberflächenkontamination“.

Dieses Verfahren hat aber auch seine Schwachpunkte:

1. Die [Strahlenschutzverordnung](#) soll den Glauben vermitteln, dass wenn man nach den aktuellen Werten den radioaktiven Abfall:
 - unbeschränkt freigibt und ohne weitere Kontrollmöglichkeit in den Stoffkreislauf zurückgeführt bzw.
 - beschränkt freigibt, um auf Deponien abgelagert zu werden oder
 - in Verbrennungsanlagen verbrannt zu werden
 dass dann alles okay ist. Da die Tabelle 1 der Strahlenschutzverordnung aber in Abständen verschärft wird (prinzipiell ist das ja gut), resultiert daraus, „Was heute für manche Isotope bei der Freigabe legitim ist, müsste vielleicht ein paar Jahre später in ein Endlager gebracht werden.“ Aber einmal freigegebene radioaktive Abfälle entziehen sich späterer jeglicher Kontrolle!
2. Die Tabelle 1 der Strahlenschutzverordnung ist unvollständig. Fusionsforscher haben schon länger angemahnt, dass für bestimmte Isotope keine Richtwerte in der Strahlenschutzverordnung enthalten sind wie z.B. ^{26}Al , ^{32}Si , $^{91,92}\text{Nb}$, ^{98}Tc , $^{113\text{m}}\text{Cd}$, $^{121\text{m}}\text{Sn}$, ^{150}Eu , $^{157,158}\text{Tb}$, $^{163,166\text{m}}\text{Ho}$, $^{178\text{n}}\text{Hf}$, $^{186\text{m},187}\text{Re}$, ^{193}Pt , $^{208,210\text{m},212}\text{Bi}$, ^{209}Po [42].
3. Zum Nachweis der Einhaltung der Freigabewerte sind radiologische Messungen nötig. Dazu wird meist eine Freimessanlage genutzt. Da man damit nur Gammastrahlung, und die auch nur ohne deren Energiespektrum, messen kann, werden sogenannte [Nuklidvektoren](#) zur Normierung herangezogen [63]. Was man so alles falsch machen kann, wenn man einen verkehrten Nuklidvektor zur Freigabe heranzieht, lesen Sie bitte unter [64].

Achtung: Die radioaktiven Abfälle von Fusionsreaktoren werden insbesondere auch Tritium enthalten, das aber in einer Freimessanlage direkt nicht erfasst werden kann! (Siehe auch: „Was ist bei der Wartung bzw. beim Rückbau bezüglich des Tritiums zu beachten?“)

Mit welchen Mengen an radioaktiven Abfall muss man bei der Kernfusionsreaktoren rechnen?

Bei radioaktiven Abfällen handelt es sich um radioaktive Stoffe (im Sinne des §2 Abs. 1 [AtG](#)), die nach ihrer Nutzung nicht mehr benötigt werden und auch nicht anderweitig genutzt werden können und nach § 9a AtG geordnet beseitigt werden müssen. Die Schätzungen der radioaktiven Abfallmengen und deren Kategorisierung unterscheiden sich natürlich je nach Konzept und je nach Gesetzeslage in dem jeweiligen Land.

In einer Konzeptstudie aus dem Jahr 2005 [45] hatte man für unterschiedliche Modelle von Fusionsreaktoren radioaktive Abfallmengen von 57860 t bis 163000 t berechnet.

Beim [Rückbau des AKWs Krümmel](#) mit einer Gesamtmenge von 540000 t des Kernkraftwerks, wird geschätzt, dass nur 1 bis 3 Prozent als radioaktiver Abfall endgelagert werden muss, d.h. also 5400 t bis 16200 t. **Damit produziert ein Fusionskraftwerk circa die zehnfache Menge radioaktiven Abfall gegenüber einem Kernkraftwerk.**

Was ist bei der Wartung bzw. beim Rückbau bezüglich des Tritiums zu beachten?

Der Tritiumgehalt in den verschiedenen Abfallarten ist ein Schlüsselparameter für die Auswahl des Abfallbehandlungsverfahrens sowie für die Annahmekriterien für Endlager. Bei der Aufarbeitung von radioaktiven Materialien von Fusionsreaktoren muss man mit einer Gammastrahlung bis zu 10000 Sv/h [45]. Und dies trifft sowohl auf die während der Wartung auszubauenden Teile, aber auch auf den Rückbau des Fusionskraftwerkes zu.

Wegen dieser extrem hohen Strahlung können NUR ferngelenkte Systeme zum Abbau der auszutauschenden Teile eingesetzt werden. Man bedenke bitte, dass die Spezial-Roboter, die in Fukushima Kernbrennstoff-Proben nehmen, nur 1/5 der oben angegebenen Strahlung vertragen. Übrigens gibt man sich der Illusion hin, dass man die gesamte Aufarbeitung des radioaktiven Abfalls von einem Fusionsreaktor in weniger als einem Jahr mit diesen ferngelenkten Systemen schaffen würde [45].

Kann man alle relevanten Isotope im radioaktiven Abfall von Fusionsreaktoren einfach messen?

Nein! Dieses "Nein" ist aber nicht spezifisch für den Abfall von Fusionsreaktoren, sondern es gibt diese Schwierigkeiten bei allen radioaktiven Abfällen aus kerntechnischen Anlagen.

Angesichts der potenziell großen Menge an radioaktiven Abfällen, die während der Lebensdauer eines Fusionsreaktors anfallen, sind zerstörungsfreie Analysemethoden grundsätzlich zu bevorzugen, da diese einen geringeren Aufwand als zerstörende Verfahren erfordern. Auch aus Sicht des Strahlenschutzes sind die zerstörungsfreien Methoden ebenfalls zu bevorzugen.

Die Radionuklide, die erhebliche Auswirkungen auf die mittel- und langfristige Entsorgung aktivierter Bauteile haben, sind u.a. ^{54}Mn , ^{55}Fe , ^{59}Ni , ^{60}Co , ^{93}Zr und ^{94}Nb . Die Isotope ^{54}Mn , ^{60}Co und ^{94}Nb sind relativ leicht über die Gammaskopie nachzuweisen und zu quantifizieren. Jedoch geben die anderen Isotope kaum bis gar keine Gammastrahlung ab. Insbesondere ^{55}Fe und ^{59}Ni zerfallen durch Elektroneneinfang und werden traditionell durch zerstörende Charakterisierungstechniken entweder über die Massenspektroskopie oder Flüssigszintillationszählung, unter Ausnutzung der emittierten Auger Elektronen nachgewiesen.

Das gleiche gilt auch für den Betastrahler ^{93}Zr [65].

Und auch für die Messung von Tritium in Abfällen von Fusionsreaktoren kann nicht die Gammaskpektrometrie verwendet werden. Die Korrelation von Tritium mit anderen aktivierten Nukliden ist nicht repräsentativ, da Tritium über unterschiedliche Mechanismen in das Material gelangen kann. D.h. hier muss man sehr achtsam Nuklidvektoren von vergleichbaren Materialien erarbeiten. Dafür können wiederum nur die zerstörenden Methoden angewandt werden [42].

Ist bei Fusionskraftwerken eine mittelfristige Lagerung von radioaktivem Abfall notwendig?

Ja, die mittelfristige Lagerung von radioaktiven Abfällen ist Teil des geplanten Konzeptes des Abfallmanagements von Fusionsreaktoren. Der Zeitfaktor beim Abfallmanagement spielt eine entscheidende Rolle für die Kosten [42]. Ob allerdings die internationalen Konzeptentwickler dabei die feinen Unterschiede zwischen einer Abklinglagerung und einer Zwischenlagerung in Deutschland kennen, ist offen.

D.h. Deutschland würde für das Abfallmanagement der radioaktiven Abfälle von Fusionskraftwerken einen bisher noch nicht definierten neuen Lagertyp benötigen, um mittelfristig eine sichere oberirdische Lagerung für mindestens ein Jahrhundert zu gewährleisten [66]. Die inneren Komponenten des Fusionsreaktors werden wahrscheinlich auch nach 100 Jahren die Grenzwerte für eine Freigabe weit überschreiten. Die Nb-Verunreinigungen (^{94}Nb) werden dafür verantwortlich gemacht [42].

Stimmt es, dass wir mit der Kernfusion kein Endlager für radioaktive Abfälle brauchen?

Nein, das stimmt nicht.

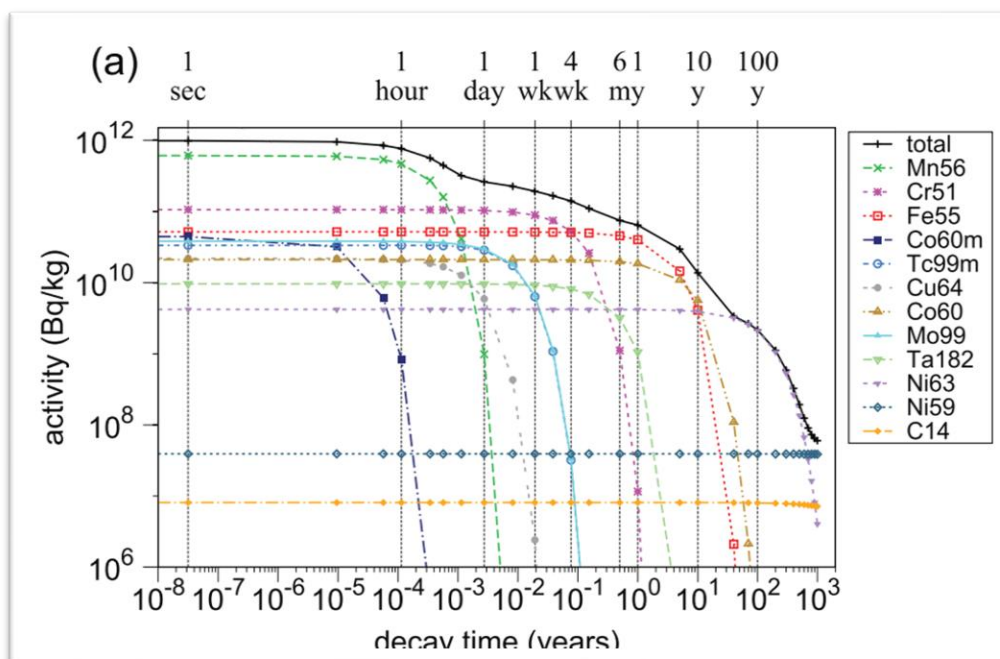


Abbildung 11: Radioactivity decay of the vacuum vessel of DEMO after operations. The different isotopes contributing to the total are indicated with Nickel-63, Nickel-59 and Carbon-14 having the longest lifetimes; Entnommen aus [67]

Fusionsreaktoren produzieren eine große Menge Atommüll, der auf Grund der Neutronenaktivierung von Verunreinigungen in den Materialien sehr lange strahlen kann. Je nach Aktivität und Isotopengehalt müssen solche Abfälle dann in ein Endlager für "schwach- und mittelradioaktive Abfälle". Ziel der Fusionsforscher ist es, nur Materialien einzusetzen, die nicht in ein Endlager für hochradioaktiven Müll müssen.

Zwar geht die Radioaktivität des Atommülls der Kernfusion nach ca. 100 Jahren deutlich zurück, es bleiben jedoch langlebige Radionuklide. Die entscheidenden Isotope im Material des DEMO-Vakuumbehälters sollen nach Abschaltung des Reaktors ^{59}Ni und ^{14}C sein, die auch nach tausend Jahren noch kräftig strahlen werden und damit über das anzuwendende Abfallmanagement entscheiden werden (siehe Abbildung 11) [67].

Gibt es Erfahrungen zur Zwischen- und Endlagerung von aktiviertem Beryllium?

JA und NEIN. Ja, denn Beryllium gehört schon lange zu einem häufig in der Kerntechnik eingesetzten Stoff ([↗Wikipedia](#)), der in Forschungsreaktoren meist als Beryllium-Reflektor eingesetzt worden ist. Man schätzt, dass ca. 45000 kg Nuklear Beryllium auf der Welt existieren und zwischengelagert werden, da Beryllium weltweit noch in kein Endlager eingebracht worden ist.

In einer Studie [68] von 2019 wurde ermittelt, dass weltweit ca. 90 Forschungsreaktoren mit Beryllium-Reflektoren existieren / existierten. In Deutschland lagern 3000 kg bestrahltes Beryllium, davon alleine 1800 kg vom [↗BER II](#). Bestrahltes Beryllium hat eine hohe Aktivität. Der Entsorgungsweg für bestrahltes Beryllium ist in Deutschland derzeit noch unklar, da eine Endlagerung im Schacht Konrad nicht garantiert werden kann. Der Grund: Wassergefährdendes Beryllium ist für den Schacht Konrad durch den [↗Planfeststellungsbeschluss](#) auf 24,5 kg begrenzt.

Das größte Problem des aktivierten Berylliums ist der Gehalt an Tritium, das in Fusionsreaktoren jedoch ein gewünschter Stoff wäre. Dabei gibt wohl zwei Probleme:

- Sauerstoff Verunreinigungen liegen im Beryllium als BeO vor. Das Tritium wird an solche Stellen physikalisch und chemisch im Metallgitter gebunden als $\text{Be}(\text{OT})_2$. Das Tritium wird erst ab Temperaturen größer 600 °C in kleinen Mengen freigesetzt.
- Im Beryllium Metallgitter bilden sich Heliumblasen, die das Tritium "auffangen" können. Dieses wird erst ab Temperaturen über 800 °C freigesetzt.

Neben dem Tritium gibt es weitere im Abfallmanagement von Beryllium zu beachtende Isotope (siehe Abbildung 12).

In dem KONNEKT Bericht [44] wurden auch Kostenschätzungen für

- das Ausheizen des Tritiums aus dem Beryllium,
- alternativ für die Dekontamination aktivierter Verunreinigungen auf chemischem Weg,
- alternativ die Abtrennung von ^{10}Be zur Freimessung mit Methoden der Isotopentrennung und
- für die Endlagerung

aufgeführt.

FORSCHUNGSPROJEKT KONEKT		MÄRZ 2021		HZB Helmholtz Zentrum Berlin	
Inventarisierung			Nuklidinventar		
• Radionuklidinventare 10 Jahre nach Abschaltung der Reaktoren					
	BER-II (Werte für 2029)	FRM-I (Werte für 2010)	FRG (Werte für 2020)	RFR (Werte für 2001)	
Nuklid	Spezifische Aktivität (Bq/g)				
H-3	1,17E+09	1,82E+09	1,77E+09	2,28E+08	
Co-60	6,25E+06	6,20E+06	6,16E+06	1,09E+06	
Cs-137	2,00E+05	2,69E+05	2,56E+05	8,42E+03	
C-14	1,97E+06	1,81E+06	3,08E+06	2,12E+03	
Be-10	7,62E+04	3,61E+04	*	2,85E+04	
Pu-238	1,39E+04	2,90E+04	*	7,11E+01	
* Werte wurden nicht übermittelt					
Peter Kate	Projekt Rückbau BER II – Teilprojekt Entsorgung			16	

Abbildung 12: Vortragsfolie zum Forschungsprojekt KONEKT; Entnommen aus [68]

Alles klar mit den radioaktiven Abfällen aus Fusionsreaktoren?

Nein. Aus diesem Grund wird in [42] der Fokus der weiteren Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet gelenkt auf:

1. Ferngelenktes Hantieren beim Austausch/ Bearbeitung radioaktiv belasteter großer und komplexer Teile. Dazu sind entsprechende ferngesteuerte Systeme notwendig, die auch bei hohen Strahlungen funktionieren.
Schon im Entwurfsprozess muss auf die leichte Zerlegbarkeit der Komponenten durch ferngelenktes Hantieren sowie die Trennung von Materialien orientiert werden.
2. Ferngesteuerte Wiederaufbereitung von radioaktiv kontaminierten Materialien, einschließlich einer radiochemischen Bearbeitung bzw. Abtrennung von Isotopen
3. Erforschung der Eigenschaften von recyceltem Reaktormaterial, sowie der möglichen Anreicherung von Isotopen
4. Der Umgang mit Tritium haltigen Materialien beim Recycling. Entwicklung von Techniken zur Entfernung von Tritium aus großen Komponenten.
5. Einschätzung des Energiebedarfs für den Recyclingprozess und die Gesamtkosten
6. Aufbau von großen und kostengünstigen Zwischenlagern für Tritium
7. Einschätzung der benötigten Recycling-Kapazität

8. Aufbau einer Recycling-Infrastruktur im industriellen Maßstab
9. Öffentliche Akzeptanz des Einsatzes von recycelten Materialien

Unter Umständen könnte die Tritium-Aktivität in den radioaktiven Abfällen dazu beitragen, dass diese anders einzustufen sind. Es sind entsprechende praktikable Abfallstrategien zu entwickeln. Lagert man die Abfälle oberirdisch, z.B. auf der Deponie Aube in Frankreich, so dürfen die radioaktiven Gase in Summe pro Jahr maximal 50 GB Aktivität enthalten. Daher ist die Entwicklung geeigneter Lösungen für die Verarbeitung, Überwachung und die Lagerung von Tritium kontaminierten Fusions-Abfällen essentiell [69]. Die Autoren orientieren auf eine Minimierung der Kreuzkontamination mit Tritium (z. B. durch Ausheizen von Tritium) und die Entwicklung von effizienten Systemen zur Entfernung von Tritium aus Wasser. UKAEA soll solch ein System entwickelt haben, das > 30000 Liter HTO pro Jahr verarbeiten kann. Unklar ist, warum wird diese Methode dann nicht in Fukushima zur Aufbereitung der Tritium-haltigen Abwasser eingesetzt? Ist die Technik vielleicht zu teuer?

8. Wirtschaftliche Aspekte

Welche Aussagen gibt es zur Wirtschaftlichkeit eines Kernfusionskraftwerks?

Aus Sicht des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag sind konkrete Prognosen zu Kosten der Erzeugung von Fusionsstrom derzeit nur spekulativ. Außerdem übt es Kritik an Berechnungen von Stromerzeugungskosten [4].

Das in der Fusionsforschung stark involvierte [Max Planck Institut für Plasmaphysik \(IPP\)](#) sieht sich außerstande, eine seriöse Prognose über die Wirtschaftlichkeit und die mögliche Strompreise für ein kommerzielles Kraftwerk, was frühestens 2055 in Betrieb geht, abzugeben: „Die Kosten eines künftigen Fusionskraftwerkes können heute nur mit großen Unsicherheiten abgeschätzt werden“ [70]. Dennoch nennt das IPP unmittelbar danach in der gleichen FAQ-Antwort einen Strompreis von 5-8 cent / kWh.

Diese Strompreiskalkulation wurde sofort von der ehemaligen Ministerin des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Stark-Watzinger, übernommen und schlussfolgerte daraus: Damit bewege sich ein Fusionskraftwerk in der Rentabilität von Kohlekraftwerken im Grundlastbereich und „Fusionsenergie ist bezahlbar“ [71]. Doch diese Kalkulation des IPP basiert auf völlig veralteten Berechnungen der EU aus dem Jahr 2005 [45], als ITER noch in der Planung war. Durch die unseriös verkürzte Darstellung in den FAQs des IPP [70] in Verbindung mit dem “© 2003-2024, Max-Planck-Gesellschaft” führte dazu, dass auch der Wissenschaftliche Dienst des Bundestages den genannten Strompreis auf das Jahr 2023 datiert hat [12].

Die “Frankfurter Rundschau” hatte etwas aufmerksamer gelesen. Laut einem Artikel in der „Frankfurter Rundschau“ vom 1.7.2023 wurde die Berechnung der EU von Table.Media auf das Preisniveau von 2023 gebracht, d.h. auf Stromgestehungskosten von 20-36 cent / kWh [72].

Das sogenannte DEMO-Kraftwerk, das erste kommerzielle Fusionskraftwerk in der Größenordnung von 500 MW, soll dem erfolgreich abgeschlossenen Experimentalreaktor ITER folgen. Letzte Prognosen des IPP gehen dafür von 2055 aus; also 50 Jahre nach der EU-Strompreiskalkulation. ITER hat sich allein zwischen dem Baubeginn 2010 und 2025 in den Kosten von 5 auf 20 Mrd.€ vervierfacht! Und ein Ende der Baukostensteigerung ist wegen der massiven technischen Probleme nicht abzusehen. Das

DEMO-Kraftwerk kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht einmal geplant werden. Wie die Vergangenheit beim Bau von Atomkraftwerken zeigt, z. B. bei dem neuen französischen Kraftwerkstyp EPR, haben sich die Bauzeiten teilweise um Jahrzehnte verlängert wie in der Normandie oder in Finnland und die Kosten verdrei- bzw. vervierfacht.

Mit welchen Bauzeiten, Betriebs- und Wartungszeiten, sowie Zeiten zum Abbau von Fusionskraftwerken rechnet man?

Heute kann man weder etwas über die technische Machbarkeit von Fusionskraftwerken sagen, noch halbwegs verlässliche Schätzungen zu diesen Zeiten abgeben. Am Beispiel von ITER erlebt man die Kluft zwischen Plänen und der Realität.

Dennoch mussten Organisationen Schätzungen abgeben, um weiterhin Förderungen zu erhalten. Die Differenzen in den Veröffentlichungen werden durch Differenzen in den verwendeten Basis-Technologien aber auch durch ein unterschiedliches Maß an Optimismus bezüglich des zukünftigen technischen Fortschritts erklärt.

Kann man der KI vielleicht mehr Realismus in den Zeitschätzungen zutrauen? ChatGPT gibt auf die Frage „**Mit welchen Planungs-, Bauzeiten, Betriebs- und Wartungszeiten, sowie Zeiten zum Abbau von Fusionskraftwerken und zur Abklinglagerung der nicht freigebaren radioaktiven Stoffe rechnet man?**“ und der nachfolgenden Diskussion folgende Angaben [73]:

- Planung und Designphase (10-20 Jahre)
- Bauphase und Inbetriebnahme (15–20 Jahre)
- Betriebsphase (30-50 Jahre)
 - abzüglich 10 bis 20% Wartung
- Rückbau (20-30 Jahre)
- Abklinglagerung radioaktiver Stoffe (Jahrhunderte bis Jahrtausende)
 - Gesamtaufwand: Für 2.000–5.000 Tonnen aktivierte Materialien: 230–575 Arbeitsjahre über den gesamten Zeitraum (einschließlich Abklingzeit und Endlagerung).

Wohlwissend, dass man den Angaben der künstlichen Intelligenz kritisch gegenüberstehen muss, sollten dessen Antwort aber zu denken geben, wenn man die gewählten Parameter zu den Wirtschaftlichkeitsberechnungen zu Fusionskraftwerken näher prüfen will!

Sollte der Bau von Fusionskraftwerken tatsächlich möglich sein, welcher Wirkungsgrad ist bestenfalls zu erreichen?

Zunächst ein Einschub mit Bezug auf den TAB Bericht [4]. In diesem Bericht spielt der Parameter „Wirkungsgrad“ überhaupt keine Rolle, sondern man bezieht sich nur auf den „Energieverstärkungsfaktor Q , der das Verhältnis von erzeugter Energie zur hierfür eingesetzten Energie“ angibt und unterscheidet dann diesen in $Q_{\text{Wissenschaft}}$ und Q_{Technik} .

Eigentlich sollte man bei Fusionskraftwerken eher nach deren Nachhaltigkeit fragen, da der Wirkungsgrad bzw. der Energieverstärkungsfaktor nur Einzelparameter sind!

Aber bleiben wir bei dem „Wirkungsgrad“, der der ausschlaggebende Faktor für die Berechnung der notwendigen Tritiummenge ist. **„Wie viel Tritium würde ein**

Fusionsreaktor über ein Jahr benötigen, um kontinuierlich 1 GW Energie zu erzeugen”.

Da man Schätzungen für den Gesamtwirkungsgrad eines Fusionskraftwerks nicht findet, überschlagen wir:

- Fakt ist, dass der eigentliche Prozess der Stromerzeugung, die Umwandlung von thermischer Energie in Strom wie jedes andere Kraftwerk auch, sehr ineffektiv ist. Der thermische Wirkungsgrad liegt zwischen \approx 30 und 45 %.
- Der Fusions-spezifische Wirkungsgrad unter Berücksichtigung der Plasmaheizung, der Tritiumerzeugung, der Kühlung und sonstigen Verbräuchen wurden auf \approx 70 % geschätzt.

D.h. der Gesamtwirkungsgrad liegt dann wahrscheinlich im Bereich von 20 bis 30%.

Allerdings wurde darin noch nicht berücksichtigt, dass bei Fusionsreaktoren die sogenannte “Energy Zone” auf ein großes Volumen verteilt ist. Bei ITER könnten das bei 235 m³ Plasma und einer geschätzten Dicke des umhüllenden Materials von einem Meter über 20000 m³ angrenzendes Blanket-Material sein. Die Neutronenenergie wird in eine thermische Leistung verteilt in einem riesigen Volumen umgesetzt (geringe \approx Leistungsdichte), die dann erst über Medien abzuführen ist. Es gibt keine Studie, die sich darüber Gedanken gemacht hat, wie man diese thermische Energie aus diesem riesigen Volumen effektiv “aufzusammeln” kann. **Bis zu einer solchen Studie sind die veröffentlichten Wirkungsgrade und die darauf aufbauenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen reines Wunschdenken.**

Gibt es Schätzungen zur Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Wartbarkeit und Inspektionsfähigkeit von Fusionsreaktoren?

Ein Pionier der amerikanischen Fusionsforschung resümierte in einem Vortrag 2019, was man aus 40 Jahren Fusionsforschung lernen sollte [74]. Er konstatierte, dass die Verfügbarkeit der Fusionsreaktoren der entscheidende Faktor für deren Wirtschaftlichkeit sein wird. Doch weltweit gibt es keine Experten und keine Forschungsprogramme mit einer ernsthaften Forschung für eine realistische Abschätzung der Verfügbarkeit solch komplexer Systeme. **“Die Verfügbarkeit ist die Achilles Ferse der Kernfusion”.**

Es gibt dabei zwei entscheidende Parameter (siehe Abbildung 13):

- MTBF - Mean time between failures (Mittlere Zeit zwischen Ausfällen)
- MTTR - Mean time to repair (Mittlere Zeit für die Reparatur)

Überträgt man die Erfahrungen aus anderen Technologien auf die Kernfusion, dann wird die mittlere Zeit zwischen Ausfällen bei den Blankets /Divertor in der Größenordnung von Tagen bis Stunden liegen. Jedoch wird die mittlere Zeit für eine Reparatur in der Größenordnung von Monaten liegen. Hier gibt es einen riesigen Unterschied zwischen den erforderlichen und den zu erwartenden Werten!

Reliability/Availability/Maintainability/Inspectability (RAMI) is a serious challenge that has major impact on engineering feasibility and economics

Availability required for each component needs to be high

Component	#	failure rate (1/hr)	MTBF (yrs)	MTTR/type		Fraction Failures Major	Outage Risk	Component Availability
				Major (hrs)	Minor (hrs)			
Toroidal	16	5×10^{-6}	23	10^4	240	0.1	0.098	0.91
Two key parameters: MTBF – Mean time between failures MTRR – Mean time to repair								
Magnet supplies	4	1×10^{-7}	1.14	72	10	0.1	0.007	0.99
Cryogenics	2	2×10^{-4}	0.57	300	24	0.1	0.022	0.978
Blanket	100	1×10^{-5}	11.4	800	100	0.05	0.135	0.881
Divertor	32	2×10^{-5}	5.7	500	200	0.1	0.147	0.871
Hg/CD	4							0.884
Fueling	1							0.998
Tritium System	1							0.995
Vacuum	3							0.998
Conventional equ								0.952
TOTAL SYSTEM							0.624	0.615

DEM0 availability of 50% requires:

- Blanket/Divertor Availability ~ 87%
- Blanket MTBF > 11 years
- MTRR < 2 weeks

Extrapolation from other technologies shows that for fusion blankets/divertor, the expected MTBF is as short as -hours/days, and MTRR ~months. GRAND Challenge: Huge difference between Required and Expected!!

Abbildung 13: Zuverlässigkeit/ Verfügbarkeit/ Wartbarkeit/ Inspektionsfähigkeit (RAMI) ist eine ernsthafte Herausforderung, die erhebliche Auswirkungen auf die technische Durchführbarkeit und Wirtschaftlichkeit hat. Abbildung aus einem Vortrag von M. Abdou, Keynote ISFNT-14, 9-23-2019 23; Entnommen aus [74]

Gibt es Modelle zur möglichen Integration von Grundlastkraftwerken in ein Stromnetz nach 2045?

Das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) hatte im Auftrag der **ESYS** Modellbetrachtungen zur Wirtschaftlichkeit einer möglichen Integration von generischen Grundlastkraftwerken (Atomkraftwerke, Fusionskraftwerke, Geothermiekraftwerke) untersucht [75]. Folgende Schlussfolgerung aus dieser Studie scheint wesentlich zu sein: „Aus den vorliegenden ‚modellgestützten Systemanalysen zur potentiellen Rolle von Grundlastkraftwerken im Rahmen eines dekarbonisierten europäischen Energiesystems‘ können Kostenkorridore für die Wettbewerbsfähigkeit von Grundlastkraftwerken abgeleitet werden. Die Parameteranalyse hat gezeigt, dass

- die Investitionskosten nicht oberhalb von 10000 €/kW liegen sollten.
- Bezüglich der Stromgestehungskosten der Grundlastkraftwerke ergeben sich Kostenkipppunkte bei etwa 80 bzw. 90 €/MWh, je nach Ausbau der Erneuerbaren Energien, ab denen Grundlastkraftwerke unter den getroffenen Annahmen nicht mehr wettbewerbsfähig sind.“

D.h. Stromgestehungskosten der Grundlastkraftwerke müssten auf dem Niveau von Photovoltaik und Windkraft liegen. Zur Einordnung der Aussage „**Kostenkipppunkte bei etwa 8 bzw. 9 cent / kWh**“ lesen Sie bitte weiter unter: „Wie hoch sind derzeit die Stromgestehungskosten in Deutschland?“.

Übrigens hatte die ESYS auf der Grundlage der Studie von Fraunhofer dann eine eigene Interpretation vorgenommen [76], aber obige Kostenkipppunkte nicht so klar kommuniziert. Falls Sie zu möglichen Interessenskonflikten bei ESYS Studien erfahren

wollen, lesen Sie bitte weiter unter „Ist die sogenannte Politikberatung bezüglich der Fusionsforschung durch das Akademien Projekt „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS) frei von Interessenskonflikten?“.

Wie hoch sind derzeit die Stromgestehungskosten in Deutschland?

Unter Stromgestehungskosten versteht man die Kosten für die Errichtung und den jährlichen Betrieb einer Anlage im Verhältnis zur Stromerzeugungsmenge innerhalb der Lebensdauer der Anlage.

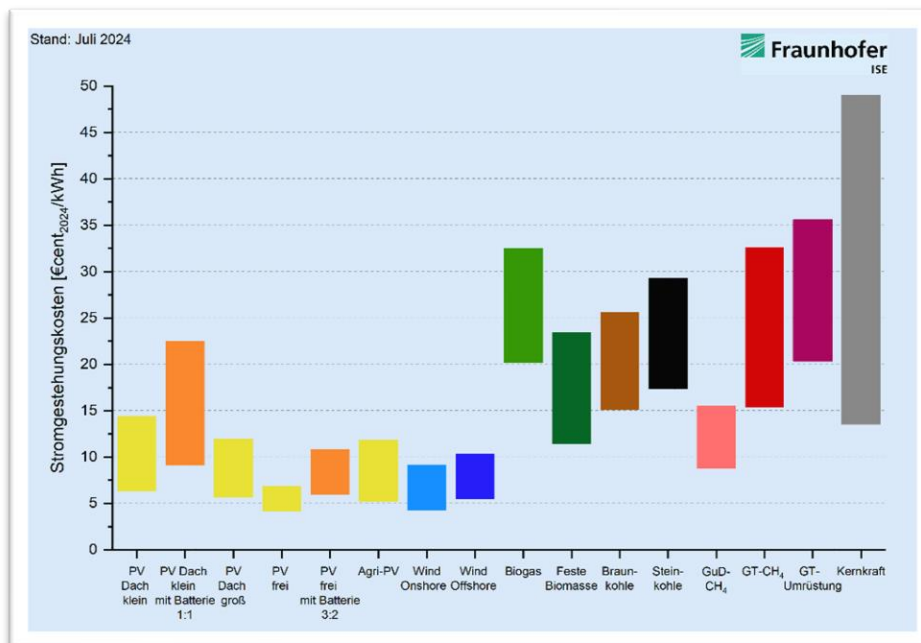


Abbildung 14: Stromgestehungskosten für Erneuerbare Energien und konventionelle Kraftwerke an Standorten in Deutschland im Jahr 2024. Spezifische Stromgestehungskosten sind mit einem minimalen und einem maximalen Wert je Technologie berücksichtigt; © Fraunhofer ISE; Entnommen aus [77]

Die Abbildung 14 zeigt eine Analyse der [Stromgestehungskosten](#) in Deutschland für das Jahr 2024. Man erkennt, dass die Atomkraftwerke mit einer großen Varianz am oberen Rand der Kosten liegen. Laut „Frankfurter Rundschau“ vom 1.7.23 wurden Stromgestehungskosten für Fusionskraftwerke von 20-36 cent pro kWh angegeben [72].

Wie ist der Trend der Stromkosten zu bewerten?

Die Stromkosten für die Erneuerbaren Energien sinken laufend und die für Atomkraftwerke steigen stetig (siehe Abbildung 15).

Bei dieser Dynamik sind Wirtschaftlichkeitsberechnungen für futuristische Fusionskraftwerke eher ein Blick in die Glaskugel.

Aber Minister, die auf der Basis veralteter, geschätzter Strompreise (2005) den Bürgern die Fusionsforschung weiterhin schmackhaft machen wollen, handeln zwar unehrenhaft, aber Politiker sind leider „nur“ [ein Berufsstand mit beschränkter Haftung](#): „Wer im Job einen Fehler macht, muss dafür meist selbst geradestehen. Doch die Fehler von Politikern müssen die Bürger ausbaden“.

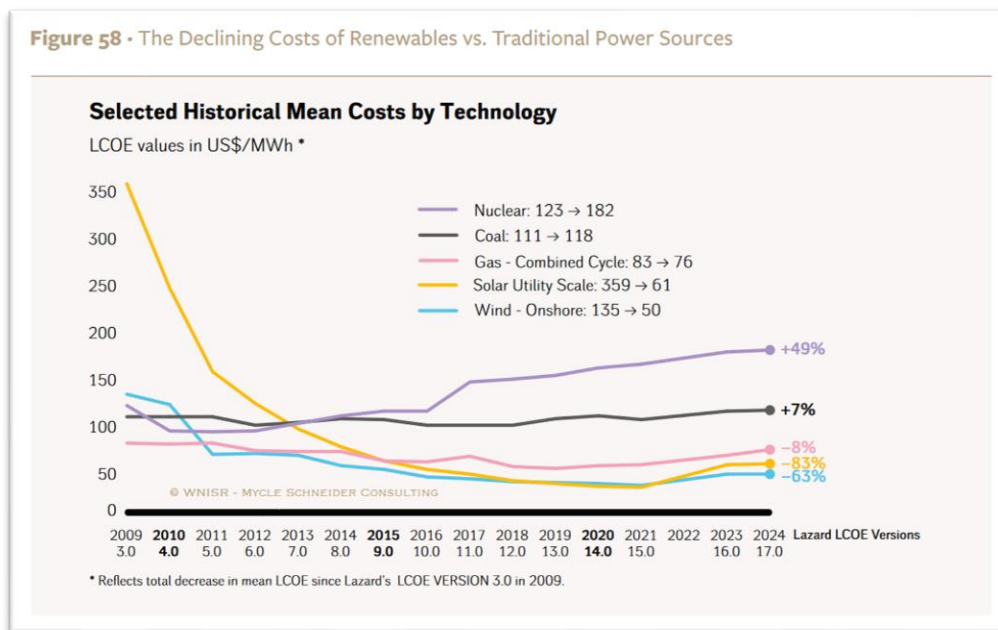


Abbildung 15: Sinkende Kosten für erneuerbare Energien im Vergleich zu traditionellen Energiequellen Abbildung 58; Entnommen aus [78]

Notes: LCOE: Levelized Cost of Energy

*This graph reflects the average unsubsidized LCOE values for a given version of LCOE study. It primarily relates to the North American energy landscape but reflects broader/global cost developments.

9. Wissenschaftskritik

Wird die Forschungspolitik in Deutschland bezüglich der Kernfusion von Lobbyisten beeinflusst?

Ja eindeutig! Hier ist vor allem die Zusammenarbeit der Lobbyisten mit politischen Entscheidungsträgern zu nennen, die teilweise die Vorlagen für Gesetze ausarbeiten oder in den Fachausschüssen des Bundestages völlig einseitig zugunsten der Kernfusion plädieren. Jüngstes Beispiel dafür ist die Anhörung im Wissenschaftsausschuss zur Änderung des Atomgesetzes im Juli 2024 [79]. Dort waren nur Befürworter der Kernfusion als Experten geladen.

Die öffentlichkeitswirksame Wiederholung interessengeleiteter Postulate der Kernforschung soll politisch umstrittene Forschungsausgaben legitimieren. Ein Beispiel: Die ehemalige Wissenschaftsministerin Stark-Watzinger (FDP) behauptete 2023, Kernfusionsreaktoren seien in der Grundlast einsetzbar und würden 2050 Strom für 5-8 Cent pro kWh Strom produzieren. Diese Aussage basiert auf einer völlig veralteten Studie aus dem Jahr 2005 (siehe Seite 40).

Ist die sogenannte Politikberatung bezüglich der Fusionsforschung durch das Akademien Projekt „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS) frei von Interessenskonflikten?

Nein! Anlass für die obige Frage bildete der sogenannte Impulsbeitrag „Kernfusion als Baustein einer klimaneutralen Energieversorgung? Chancen, Herausforderungen, Zeithorizonte“ [28] von 2024:

- Die Teilnehmer des Basis-Workshops für diesen Impulsbeitrag waren nur interne Mitarbeiter und als Expert*innen externe Personen mit massiven Interessenskonflikten.
- Neben den Projekt-Autor*innen haben wiederum externe Personen mit massiven Interessenskonflikten als "Weitere Mitwirkende" an der Veröffentlichung mitgewirkt.
- Der Impulsbeitrag wurde nicht nach dem "Leitfaden für die Erarbeitung von Stellungnahmen zur Politik- und Gesellschaftsberatung im Rahmen des Ständigen Ausschusses der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina" [80] erstellt. Die angeblich angewendeten Qualitätssicherungsmaßnahmen wurden nicht transparent veröffentlicht.
- Es wird angezweifelt, dass eine unabhängige Politikberatung in einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung finanzierten ESYS Projekt erfolgen kann, da das BMBF ja auch das Förderprogramm zur Fusionsforschung verwaltet.
Es ist nicht vorstellbar, dass Mitarbeiter, gefördert durch das BMBF, in einem Impulsbeitrag empfehlen dürften, die Subventionen in die Fusionsforschung zu drosseln!

Gibt es die "Wissenschaftsfreiheit" in Großforschungsanlagen?

Wohl eher nein. Aus dem ITER-Projekt dringt keine Kritik nach außen. Die hohe finanzielle Abhängigkeit des Gesamtprojekts, aber auch die individuellen Karrieren aller 5000 Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen, die ebenfalls stark abhängig von finanziellen Ressourcen aus Politik und Wirtschaft sind, verhindern eine kritische Auseinandersetzung in und mit den Projekten.

ITER ist ein typisches Beispiel für Big Science [81]:

„Man muss sich bewusst machen, dass das heutige Zeitalter von Big Science nichts mehr mit der Physik zu tun hat, die Anfang des vorigen Jahrhunderts ihre Blütezeit hatte. Und das liegt nicht daran, dass alles schwieriger geworden ist, wie so oft behauptet wird. Tatsache ist: Je größer die Institutionen, desto enger der Forschungskorridor und desto weniger Raum für Kreativität. Ich sehe auch darin eine kulturelle Fehlentwicklung: die Vorstellung, durch Geldmittel, Einsatz von genügend Personal und guter Organisation alles erreichen zu können, so als seien Erkenntnisse Waren, die man am Fließband produziert“, so [Alexander Unzicker](#) in einem Interview [82].

Dieses System hat auch noch andere Schattenseiten, wie z. B. den Verlust wissenschaftlicher Qualitätsstandards. Ein bekanntes Phänomen ist der sogenannte Bestätigungsfehler („confirmation bias“), der durch menschliches Verhalten und institutionelle Anreize verstärkt werden kann. Dadurch besteht die Gefahr, dass Wissenschaftler Daten und Experimente bevorzugen, die ihre Hypothesen bestätigen, während gegenteilige Hinweise weniger Beachtung finden. Eine [Falsifizierung](#) durch Gegenthesen im Sinne von [Karl Popper](#) wird wahrscheinlich nicht vorgenommen. Dies führt zu einem hermetischen Wissenschaftsbetrieb, der sich gegen Kritik immun macht und abschottet.

Gibt es „Wissenschafts- bzw. „Akademische Freiheit“ in den Naturwissenschaften?

Nein, denn die Science Community ist in ein Netz von Abhängigkeiten verstrickt. Sie ist interessengeleitet und eben nicht interessenlos. Dieses Verdikt gilt generell für den

Wissenschaftsbetrieb, verschärft sich aber im Kontext von Großforschungsanlagen (Siehe auch: „Gibt es die "Wissenschaftsfreiheit" in Großforschungsanlagen?“). Dies wäre die erwartbar oberflächliche Antwort.

Erweitert man jedoch die Fragestellung in Bezug auf das Selbstverständnis der Naturwissenschaft, dann wird das exakte (!) Denken selbst in den Fokus genommen. Und da ist es mit der „Freiheit und Exaktheit im Denken“ des Naturwissenschaftlers eben auch nicht so weit her. Warum?

Wir fragen: Was wäre, wenn (Natur)wissenschaft gar nicht missbraucht würde, sondern grundsätzlich aus ihren eigenen Begrifflichkeiten/ Paradigmen heraus nur ihre logische Anwendung fände?

Ist die Annäherung der Naturforscher an die Natur, ist ihr Verständnis von Naturphänomenen wirklich wertneutral und unschuldig?

Oder versteckt sich in der FORM des Denkens nicht auch schon INHALT? Diese Frage zielt in ihrer Kritik auf einen wesentlichen weiteren Horizont als nur auf die Behauptung eines interessenlos geleiteten Forschens. Sie zielt auf eine Kritik von Denkstrukturen, deren Entstehen wesentlich verknüpft sind mit einer sehr kulturhistorisch, 7eurozentristischen Sichtweise auf Naturabläufe. Eine knappe Diskussion zum Thema „Wissenschaftskritik“ findet sich hier [81] S.26/27.

10. Stichwortverzeichnis

1

10 μ Sv Konzept 24, 35

A

Abfall
 radioaktiver 34, 36
 Abfallmanagement 19, 23, 24, 37, 38
 Abklingzeit 38
 Abwasser
 Tritium-haltig 19
 Abwässer
 Tritium-haltig 40
 Atomgesetz 12

B

Beryllium 19, 20, 24, 33, 38
 Endlager 34
 Toxizität 34
 Blanket 21, 34, 42
 Blei 21, 34
 Bundestagsfraktion 11, 13

C

Club of Rome 13, 14

D

Dauerbetrieb 21
 Dekarbonisierung 13
 DEMO 10, 19, 20, 21, 23, 38, 40
 Deuterium 18
 displacement per atom 23
 dpa 23

E

Emissionen
 radioaktive 28
 Endlager 26
 Annahmekriterien 36
 für Beryllium 38
 Endlagerung 25
 Energieeinsparung 10
 Energieerzeugung
 Netto 17
 Energieverstärkungsfaktor 41
 Erderwärmung 8
 Ereignis
 auslegungsüberschreitend 28
 Erneuerbare Energie 9, 14, 15, 44, 45
 EURATOM 10, 11
 EUROFER97 23
 EUROfusion 10, 20

Fassung vom 30.01.2025

F

Ferngelenktes Hantieren 26, 31, 36, 39
 Förderprogramm 11
 Forschungspolitik 45
 Freigabe 35
 Freigabewert 24
 Fusion Roadmap 18
 Fusionsforschung 9, 10, 11
 Fusionskraftwerk
 Abbau 41
 Abfall 36
 Abwärme 27
 Bau 26
 Bauphase 41
 Betrieb 26
 Betriebsphase 41
 Betriebszyklen 23
 Endlager 37
 Endlagerung 26
 Langzeitfolgen 26
 Lebensdauer 26
 Leistungsdichte 42
 Materialschäden 23
 Nachhaltigkeit 26
 Planung und Designphase 41
 Recycling 26
 Regelbetrieb 28
 Ressourcenverbrauch 26
 Rückbau 25, 26
 Stilllegung 26
 Verfügbarkeit 42
 Wartung 41
 Wasserverbrauch 27
 Wirkungsgrad 27, 41, 42
 Wirtschaftlichkeit 42

G

Großforschung 11, 47
 Grundlastkraftwerk 15, 25, 43

H

Helium 19, 21, 23, 38

I

IFMIF-DONES 22, 23
 Interessenskonflikt 43, 44, 45
 ITER 10, 18, 19, 21, 23, 28, 31, 33, 40, 41, 42, 46

K

Kanada 31, 32
 Kernfusion
 kontrollierte 9

Kernfusionsforschung 17
 Kernwaffe 15, 16
 Kinderkrebsstudie 30
 Klimaschutzplan 15
 Klimawandel 13
 Kostenkipppunkt 43
 Krisenfall 12
 Kühlwasser 27

L

Leistung
 thermische 42
 Leistungsdichte 42
 Leukämie 30
 Lithium 20, 21, 34

M

Materialversprödung 25
 Meilensteine 17

N

Nachhaltigkeit 8, 26, 41
 Nachhaltigkeitsdefinition 8
 Neutronenaktivierung 22, 23
 Normalbetrieb 28
 Nuklidvektor 35, 37

P

Plasma 21, 42
 Postwachstum 14
 Primärenergiebedarf 13, 27
 Proliferation 15

R

Radioaktivität
 künstlich freigesetzte 30
 Regelbarkeit 14
 Rückbau 36

S

Stahl 23
 Strahlenbelastung 31
 Stromgestehungskosten 40, 43, 44

T

Tritium 16, 19, 20, 24, 25, 28, 30, 36, 39, 41
 Bestimmung von 33
 Breeding-Verhältnis 20
 Dosimetrie von 32
 Emission 28
 Emission von 30

epidemiologische Studien 32
Erbrüten von 16, 20
Erzeugung von 42
Extraktion von 21
Forschungsbedarf 31
Gesamtinventar 19
im Boden 28
im Trinkwasser 33
in der Lebensmittelkette 31
in der Luft 28
in der Umwelt 28, 31
in Nahrungsmitteln 28
in Pflanzen 28
in Umweltkompartimenten 33
Inkorporation von 32
Messung von ... in Abfällen 37
organisch gebunden 31, 33
Personendosimeter 33
Radiotoxizität von 31
Reserve 21

Risikobewertung von 32
Selbstversorgung 16, 20, 21
Transport von 31
Umweltbelastung 19
Tritium Selbstversorgung 18
Tritiuminventar 16

U

Umweltbelastung
Tritium 19
Umweltverschmutzung
thermische 14, 27
Uran 24

V

Verunreinigung 19, 23, 24, 38

W

Wachstum 8, 10, 13, 14, 27
Wachstumskritik 8, 14
Wartung 20, 21, 31, 36
Wartungszyklus 25
Wirkungsgrad 41
Gesamt- 42
thermischer 42
Wirtschaftlichkeit 40, 44
Wissenschaftskritik 47
Wolfram 20, 25

Z

Zwischenlager 37, 39

11. Literaturverzeichnis

- 1 Wurbs S., Dehlwes S., Lübke A. u.a.: Kernfusion als Baustein einer klimaneutralen Energieversorgung? (August 2024) 56
https://doi.org/10.48669/esys_2024-8
- 2 Wissenschaftlicher Klimabeirat Hessen: STELLUNGNAHME: Welchen Beitrag kann lasergetriebene Kernfusion zur Erreichung der hessischen Klimaziele leisten? (November 2024)
https://klimabeirat-hessen.de/sites/klimabeirat.hessen.de/files/2024-11/241128_stellungnahme_laserbasierte_kernfusion_0.pdf
- 3 Öko-Institut e.V. Englert M., Kopp A.: Übersichtsstudie Kernfusion für den Klimabeirat Hessen (15.11.2024)
https://klimabeirat-hessen.de/sites/klimabeirat.hessen.de/files/2024-11/uebersichtsstudie_kernfusion_oeko-institut-darmstadt.pdf
- 4 TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) Grünwald R.: Auf dem Weg zu einem möglichen Kernfusionskraftwerk - Wissenslücken und Forschungsbedarfe aus Sicht der Technikfolgenabschätzung; TA-Kompakt Nr. 1 ISSN: 2944-8077 (01.12.2024)
https://www.tab-beim-bundestag.de/projekte_auf-dem-weg-zu-einem-moeglichen-kernfusionskraftwerk-wissensluecken-und-forschungsbedarfe-aus-sicht-der-technikfolgenabschaetzung.php
- 5 Dittmar M.: Status and Prospects of the ITER Plasma Physics Experiment. Is it time to terminate the project? Part I (10.7.2019) 21
<http://ihp-ix2.ethz.ch/energy21/ITERreport1.pdf>
- 6 Dittmar M.: Go-No-Go Problems for controlled Nuclear Fusion on Planet Earth; do we already know enough to terminate public research funding for nuclear fusion? Part II (18.11.2019) 18
<http://ihp-ix2.ethz.ch/energy21/ITERreport2.pdf>
- 7 Dittmar, M.: Gutachterliche Stellungnahme für die Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen "Status and Prospects of the ITER Plasma Physics Experiment. Is it time to terminate the project? Part I" (10.07.2019)
<https://umweltfairaendern.de/wp-content/uploads/2023/10/Kernaussagen-ITER-Analyse-Dittmar-20191111.pdf>
- 8 Kotting-Uhl S., Badum L., Hoffmann B. u.a. und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Fusionsreaktor ITER nicht als Klimaschutzmaßnahme ausweisen; Drucksache 19/10221 (15.05.2019)
<https://dserver.bundestag.de/btd/19/102/1910221.pdf>
- 9 taz Kreuzfeldt M.: Energie durch Kernfusion- Für immer ein Traum?; Interview mit Dittmar M. (22.08.2020)
<https://taz.de/Energie-durch-Kernfusion!/5707537/>
- 10 Reinders, L. J.: The Fairy Tale of Nuclear Fusion; Springer ISBN 978-3-030-64343-0 (2021)
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-64344-7>
- 11 Murphy T.W.: Limits to economic growth; Nat. Phys. (18) (August 2022) 844-847
<https://doi.org/10.1038/s41567-022-01652-6>
- 12 Wissenschaftliche Dienste des Bundestages: Kernfusion - Finanzierung und Prognosen; WD 8 - 3000 - 057/23 (21.09.2023) 18
<https://www.bundestag.de/resource/blob/975048/1c183472e7f06e25060784d774616c50/WD-8-057-23-pdf.pdf>
- 13 Wissenschaftliche Dienste des Bundestages: Sachstand - Kernfusion Übersicht über die Aktivitäten weltweit; WD 8 - 3000 - 065/23 (13.11.2023) 18
<https://www.bundestag.de/resource/blob/984120/1497846cb274b54c35c39815e9872498/WD-8-065-23-pdf.pdf>
- 14 TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) Grünwald A., Grünwald R., Oertel D., Paschen H.: Kernfusion - Sachstandsbericht; Arbeitsbericht Nr. 75 (März 2002) 82
<https://www.itas.kit.edu/pub/v/2002/grua02b.pdf>
- 15 Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Förderprogramm Fusion 2040 - Forschung auf dem Weg zum Fusionskraftwerk (01.06.2024)
https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/DE/7/890132_Foerderprogramm_Fusion_2040.pdf
- 16 EUROfusion: European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy (LONG VERSION) (September 2018)
https://euro-fusion.org/wp-content/uploads/2022/10/2018_Research_roadmap_long_version_01.pdf
- 17 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK): Bundesbericht - Energieforschung 2024 - Forschungsförderung für die Energiewende (Juli 2024) 86
<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/240716-bundesbericht-energieforschung-2024.html>
- 18 Wissenschaftsrat: Empfehlungen zur Zusammenarbeit von Großforschungseinrichtungen und Hochschulen; Drs. 24/91 (29.01.1991) 172
https://www.wissenschaftsrat.de/download/archiv/0024-91.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- 19 Wissenschaftliche Dienste des Bundestages: Sachstand - Einzelfragen zur Kernfusionsforschung Kosten und Programme; Deutscher Bundestag WD 8 - 3000 - 144/19 (3.12.2019) 16
<https://www.bundestag.de/resource/blob/710950/9e646e9903ac230c92b90192afde2646/WD-8-144-19-pdf-data.pdf>
- 20 Bundestagsausschuß für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung: Beschlussempfehlung und Bericht zum Antrag der Fraktion der CDU/CSU "Stärkung der Fusionsforschung auf Weltklassenniveau"; Drucksache 20/6907 (01.02.2024)
<https://dserver.bundestag.de/btd/20/102/2010234.pdf>

- 21 Wissenschaftlicher Dienst des Bundestages: Rechtliche Rahmenbedingungen für die Errichtung und den Betrieb von Fusionskraftwerken zur kommerziellen Energiegewinnung; Dokumentation WD 8 - 3000 - 004/23; PE 6 - 3000 - 010/23 (28.03.2023) 38
<https://www.bundestag.de/resource/blob/948818/1db0c6a5a8cb1fb68615f78eb0858547/WD-8-004-23-PE-6-010-23-pdf-data.pdf>
- 22 Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens W.W.: THE LIMITS TO GROWTH - A Report for THE CLUB OF ROME'S Project on the Predicament of Mankind; POTOMAC ASSOCIATES BOOK (1972)
<https://www.clubofrome.org/publication/the-limits-to-growth/>
- 23 ilmedia, Ilmenau Döpel, R.: Über die geophysikalische Schranke der industriellen Energieerzeugung; Wiss. Z. TH Ilmenau 19 (1973) Heft 2 (1973) 37-52
https://www.db-thueringen.de/receive/dbt_mods_00012380
- 24 ilmedia, Ilmenau Arnold H.: Global Warming by Anthropogenic Heat, a Main Problem of Fusion Techniques (2016) 23
<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2016200087>
- 25 Steiglechner P.: Estimating global warming from anthropogenic heat emissions - conceptual and numerical modelling approaches (02.10.2018) 111
<https://doi.org/10.25932/publishup-49886>
- 26 Steiglechner P., Martin M., Feulner G.: Nuclear power to tackle climate change? Anthropogenic Heat Flux (AHF) -A Direct Climate Forcing; Conference: EGU 2019 (April 2019) 1
<https://www.researchgate.net/publication/339029406>
- 27 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung (01.11.2016)
https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/klimaschutzplan-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- 28 Wurbs S., Dehlwes S., Lübke A. u.a.: Impulsbeitrag: Kernfusion als Baustein einer klimaneutralen Energieversorgung? Chancen, Herausforderungen, Zeithorizonte; Publikation der ESYS https://doi.org/10.48669/esys_2024-8 (August 2024) 56
https://doi.org/10.48669/esys_2024-8
- 29 Abdou M.: Physics and technology considerations for the D-T fuel cycle and conditions for tritium fuel self-sufficiency; Virtual Seminar at MIT (28.04.2021) 33
https://bpb-us-w2.wpmucdn.com/research.seas.ucla.edu/dist/d/39/files/2021/09/Abdou_MIT_Virtual_Seminar_4-28-2021_Tritium_Fuel_Cycle.pdf
- 31 EUROfusion: Mail vom Communications Officer zum Aktualitätsstand der "EUROfusion Roadmap" (09.01.2025)
- 32 Iler R.A.: Will fusion run out of fuel?; QUESTION OF THE WEEK (09.07.2018)
<https://www.iter.org/node/20687/will-fusion-run-out-fuel>
- 33 Suk-Kwon K., Dong Won L., Young-Dug B. u.a.: Calculation of Tritium Breeding Ratios for the Fusion Reactor Concept; Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting PyeongChang, Korea, October 30-31, 2008 (31.10.2008) 683-684
https://www.kns.org/files/pre_paper/11/293%EA%B9%80%EC%84%9D%EA%B6%8C.pdf
- 34 Day, C.: Tritium fuel cycle and self-sufficiency - R&D for DEMO and required extrapolations beyond ITER; EUROfusion KIT (18.11.2016) 40
<https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Technical%20Meeting%20Proceedings/4th%20DEMO/website/talks/November%2015%20Sessions/Day.pdf>
- 35 Abdou M. u.a.: Physics and technology considerations for the deuterium–tritium fuel cycle and conditions for tritium fuel self sufficiency ; Nucl. Fusion 61 (2021) 013001 (2021) 52
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1741-4326/abbf35/pdf>
- 36 Sawan M.E., Abdou M.A.: Physics and technology conditions for attaining tritium self-sufficiency for the DT fuel cycle; Fusion Engineering and Design 81 (2006) (2006) 1131–1144
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2005.07.035>
- 37 Ibarra A.: The DONES Programme and an Overview of the IFMIF-DONES Facility; DONES Business Info Day, Spanish Embassy, Tokyo (Japan) (4.12.2023)
https://www.cdti.es/sites/default/files/2023-12/dones_infoday_a_ibarra.pdf
- 38 Bradshaw A. M. : Stellungnahme des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik ; Anhörung Kernfusion im Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages (28.03.2001)
https://www.ipp.mpg.de/639630/bt_28_03_01.pdf
- 39 University of California, Berkeley Wirth B.D.: Radiation Effects in Fusion Materials; Part 2 (07.04.2004)
http://web.archive.org/web/20070107191040/http://www.nuc.berkeley.edu/courses/classes/NE39/Wirth-FusionMaterials_lecture2.pdf
- 40 IAEA: Development of Radiation Resistant Reactor Core Structural Materials; GC(51)/INF/3/Att.7 (22.08.2007) 8
https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc51inf-3-att7_en.pdf
- 41 Lance Snead L., Wu Y., Ferguson P., Zinkle S.: Potential and Limits Fusion Neutron Sources; Sixth IAEA DEMO Programme Workshop, Moscow, Russian Federation (1.10.2019)
<https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/DPWS-6/Presentations/Day%203/5.%20Snead.pdf>

- 42 International Atomic Energy Agency Gonzalez de Vicente S M., Smith N.A., El-Guebaly, L., u.a.: Overview on the management of radioactive waste from fusion facilities: ITER, demonstration machines and power plants; Nucl. Fusion 62 (2022) 085001 20
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac62f7>
- 43 El-Guebaly L., Cadwallader L.: Integrated Management Strategy for Fusion Activated Materials: US Position and Regulations; 9th IAEA Technical Meeting on Fusion Power Plant Safety July 15 - 17, 2009 (15.07.2009) 34
https://fti.neep.wisc.edu/fti.neep.wisc.edu/presentations/lae_activated_iaea09.pdf
- 44 Daniels N., Deissmann G., Modolo G. u.a.: „Konzeptstudie zur Entsorgung von aktiviertem Beryllium aus Forschungsreaktoren (KONEKT)“, Förderkennzeichen 15S9405A-B; Fachlicher Abschlussbericht des BMBF geförderten Verbundvorhabens zwischen FZJ und HZB (Juni 2021) 179
<https://www.helmholtz-berlin.de/media/media/projekte/rueckbau/dialog/dokumente/15s9405a-b-konekt-abschlussbericht.pdf>
- 45 Maisonnier D., Cook I., Sardain P. u.a.: A CONCEPTUAL STUDY OF COMMERCIAL FUSION POWER PLANTS - Final Report of the European Fusion Power Plant Conceptual Study (PPCS); Report EFDA-RP-RE-5.0 (13.04.2005) 212
https://fire.pppl.gov/eu_ppcs_full_2005.pdf
- 46 Raeder J., Weller A., Wolf R. u.a.: Untersuchung der Sicherheit von Kernfusionskraftwerken hinsichtlich nuklearer Stör- und Unfälle; GRS-A-3726 (November 2013)
https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3611_r_01353_kernkraftwerk_stoerfaelle_bf.pdf
- 47 Fradera J. , Velarde M. , Perlado J. M. u.a.: Multiscale integral analysis of tritium leakages in fusion nuclear power plants; MPT/P5-33
<https://conferences.iaea.org/event/98/contributions/12131/attachments/5933/7307/pre-print-IAEA-FEC2016-MARTA-HTO.pdf>
- 48 Larsen G., Babineau D.: An Evaluation of the Global Effects of Tritium Emissions from Nuclear Fusion Power; Fusion Engineering and Design Volume 158, September 2020, 111690 (2020)
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111690>
- 49 Fairlie. I.: Submission: Tritium Hazards at Pickering NPP; Commission Public Hearing – Part 2 CMD 18-H6.65 File / dossier: 6.01.07 Date: 2018-05-07 Edocs: 5529681 (07.05.2018) 27
<https://api.cnsccsn.gc.ca/dms/digital-medias/cmd18-h6-65.pdf/object?subscription-key=3ff0910c6c54489abc34bc5b7d773be0>
- 50 Masson M., Siclet F., Fournier M. u.a.: Tritium along the French coast of the English Channel; Radioprotection 2005, Vol. 40, n° Suppl. 1 (Mai 2005) S621-S627
<https://doi.org/10.1051/radiopro:2005s1-091>
- 51 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Annex C. Biological effects of selected internal emitters - Tritium; ; UNSCEAR 2016 Report to the General Assembly; ISBN 978-92-1-142316-7 (Januar 2017)
https://www.unscear.org/docs/publications/2016/UNSCEAR_2016_Report-CORR.pdf
- 52 El-Guebaly L., Cadwallader L., Merrill B., Rowcliffe A.: Activated Fusion Radwaste - Disposition/Recycling/Clearance; Kickoff Meeting for ARPA-E GAMOW Program January 21-22, 2021 (22.01.2021) 38
https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/2021-02/310PM_El-Guebaly%20FINAL.pdf
- 53 International Atomic Energy Agency: ITER technical basis; IAEA-ITEREDA/DS-24, TRN: XA0201264012567 (1.1.2002) 813
<https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20238294>
- 54 Pearson R.J., Antoniazzi A.B., Nuttall W.J.: Tritium supply and use: a key issue for the development of nuclear fusion energy; Fusion Engineering and Design Volume 136, Part B (November 2018) 1140-1148
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.04.090>
- 55 Fairlie. I.: The Hazards of Tritium (13.03.2020)
<https://www.ianfairlie.org/news/the-hazards-of-tritium/>
- 56 Greenpeace Fairlie. I.: Tritium Hazard Report: Pollution and Radiation Risk from Canadian Nuclear Facilities (06/2007) (Juni 2007) 1-93
<https://www.nirs.org/wp-content/uploads/radiation/tritium/tritium06122007gphazardreport.pdf>
- 57 Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC): Tritium in drinking water (13.10.2023)
<https://www.cnsccsn.gc.ca/eng/resources/health/tritium/tritium-in-drinking-water/>
- 58 Office of Environmental Health Hazard Assessment: Public Health Goal for TRITIUM in Drinking Water (März 2006)
<https://oehha.ca.gov/media/downloads/water/chemicals/phg/phgtritium030306.pdf>
- 59 Naglav D., Magnus R., Buchner M.R. u.a.: Auf neuen Pfaden – Per Anhalter durch die Berylliumchemie ; Angew. Chem. 128 (2016) 10718-10733
<https://doi.org/10.1002/ange.201601809>
- 60 Bukaemskiy A., Caes S., Modolo G. u.a.: Investigation of kinetics and mechanisms of metallic beryllium corrosion for the management of radioactive wastes; MRS Advances 9 (2024) 391–396
<https://doi.org/10.1557/s43580-024-00835-y>

- 61 BUND e.V. Neumann, W.: Kritik und Alternativen zur Freigaberadioaktiver Stoffe beim AKW-Rückbau; Vortrag beim Fachgespräch „AKW-Rückbau – Mammutaufgabe und Konfliktherd“ von Bündnis 90 /Die Grünen (07.11.2016)
<https://slideplayer.org/amp/12134829/>
- 62 Öko-Institut e.V., Darmstadt Küppers, C.: Stellungnahme zu konzeptionellen Fragen der Freigabe zur Beseitigung auf einer Deponie bei Stilllegung und Abbau des Kernkraftwerks Obrigheim (KWO) (03.08.2015)
<https://www.oeko.de/oekodoc/2366/2015-532-de.pdf>
- 63 Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg: Leitfaden zur Freigabe nach Teil 2 Kapitel 3 der Strahlenschutzverordnung (20.10.2020)
https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/3_Umwelt/Kernenergie/Freigaben_StrlSCHVO/2020-Freigabeleitfaden-bf.pdf
- 64 Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg: Abschlussbericht „Nuklidvektorvertauschung in KKP 1“ (07.03.2024)
<https://um.baden-wuerttemberg.de/de/umwelt-natur/kernenergie/dokumente/berichte/anlagenbezogene-berichte/berichte-zum-kernkraftwerk-philippsburg?highlight=Nuklidvektorvertauschung>
- 65 Workshop on waste management for fusion - FULL PROGRAMME- Vienna, Austria (06.10.2021) 38
- 66 Empfehlung der Entsorgungskommission; ESK-Leitlinien für die Zwischenlagerung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (10.06.2013)
https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_22112013_ESK34LLAbf1730017.htm
- 67 Carr J. : Radioactive Waste;
<https://www.climate-and-hope.net/electricity-technologies/radioactive-waste>
- 68 Kate P.: Ergebnisse des Verbundforschungsprojektes KONEKT (HZB/FZJ); Anhang des Protokolls der Dialoggruppensitzung vom 09.03.2021 im Rahmen des Dialogverfahrens des HZB zum Rückbau des BER II (März 2021)
<https://www.helmholtz-berlin.de/media/media/projekte/rueckbau/dialog/protokolle/dialoggruppe/2021/dg19-20210309-protokoll-1.1-20210511-web.docx.pdf>
- 69 Gilbert M-R., Zacharuskas Ž., Almond P. u.a.: Fusion waste requirements for tritium control: Perspectives and current research; Fusion Engineering and Design Volume 202, 114296 (Mai 2024) 7
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114296>
- 70 IPP: FAQ: Was wird der Fusionsstrom kosten? (abgerufen 20.11.2024)
<https://www.ipp.mpg.de/2545460/faq7>
- 71 BMBF: Positionspapier Fusionsforschung - Auf dem Weg zur Energieversorgung von morgen (Juni 2023)
https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/7/775804_Positionspapier_Fusionsforschung.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- 72 Frankfurter Rundschau Gabel T.: "Fusionsenergie ist bezahlbar": Hat das Forschungsministerium sich verrechnet? (01.07.2023)
<https://www.fr.de/politik/fusionsenergie-kraftwerk-bmbf-prognosen-kritik-strom-energie-preise-versorgung-tbl-zr-92376580.html>
- 73 KI: Mit welchen Planungs-, Bauzeiten, Betriebs- und Wartungszeiten, sowie Zeiten zum Abbau von Fusionskraftwerken und zur Abklinglagerung der nicht freigegebenen radioaktiven Stoffe rechnet man? (13.01.2025)
<https://chatgpt.com/share/6785261d-6f1c-8010-a007-ed669d54efd9>
- 74 Abdou M.: Lessons Learned from 40 Years of Fusion Science and Technology Research; 14th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-14) 19 Budapest, Hungary (22.09.2019)
https://bpb-us-w2.wpmucdn.com/research.seas.ucla.edu/dist/d/39/files/2019/08/MAbdou_ISFNT-14_Keynote_Lessons_Learned_2019.pdf
- 75 Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI: „Modellgestützte Systemanalyse zur potentiellen Rolle von Grundlastkraftwerken im Rahmen eines dekarbonisierten europäischen Energiesystems“ (24.06.2024)
<https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2024/2304-02900.pdf>
- 76 Stöcker, P., Erlach, B., Wurbs S. u.a.: Impulsbeitrag: Kernspaltung, Erdgas, Geothermie, Kernfusion - Welche Rolle spielen Grundlastkraftwerke in Zukunft?; Publikation der ESYS https://doi.org/10.48669/esys_2024-14 (03.12.2024)
https://doi.org/10.48669/esys_2024-14
- 77 Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI: Photovoltaik mit Batteriespeicher günstiger als konventionelle Kraftwerke (06.08.2024)
<https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2024/photovoltaik-mit-batteriespeicher-guenstiger-als-konventionelle-kraftwerke.html>
- 78 Schneider A.M.: World Nuclear Industry Status Report 2024; WNISR2024 (19.09.2024)
<https://www.worldnuclearreport.org/World-Nuclear-Industry-Status-Report-2024-1046>
- 79 Anhörung zu "Für einen pragmatischen, innovationsfreundlichen Rechtsrahmen für Fusionskraftwerke in Deutschland und Europa"; 79. Sitzung des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung Drucksache 20/10383 (03.07.2024)
https://www.bundestag.de/ausschuesse/a18_bildung_forschung/oeffentliche_anhoerungen/1010504-1010504
- 80 Leitfaden für die Erarbeitung von Stellungnahmen zur Politik- und Gesellschaftsberatung im Rahmen des Ständigen Ausschusses der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina (19.03.2014)
https://www.leopoldina.org/fileadmin/redaktion/Politikberatung/pdf/2014_03_19_StA-AG-Prozess.pdf

- 81 Anti-Atom-Bündnis in Berlin und Potsdam: Naturwissenschaftliches Denken und Handeln als Herrschaftsinstrument (2023)
<https://www.atomreaktor-wannsee-dichtmachen.de/downloads.html?download=93:naturwissenschaftliches-denken-und-handeln-als-herrschaftsinstrument>
- 82 Deutsche Wirtschaftsnachrichten: Ist die Physik tot? ; Interview mit Alexander Unzicker (23.01.2022)
<https://deutsche-wirtschafts-nachrichten.de/516956/ist-die-physik-tot>