

## Pilotprojekt Regulatorik für Fusionsanlagen (ReFus)

Statusbericht  
Stand Juni 2026

Entwurf zur Kommentierung  
(„Draft for Comment“)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

In Zusammenarbeit mit:



**TÜVRheinland®**  
Genau. Richtig.



**Öko-Institut e.V.**  
Institut für angewandte Ökologie  
Institute for Applied Ecology



**MAX-PLANCK-INSTITUT**  
FÜR AUSLÄNDISCHES ÖFFENTLICHES RECHT  
UND VÖLKERRECHT



Karlsruher Institut für Technologie

## **Pilotprojekt Regulatorik für Fusionsanlagen (ReFus)**

### **Statusbericht Stand Juni 2026**

#### **Entwurf zur Kommentierung („Draft for Comment“)**

Clemens Heitsch  
Joachim Herb  
Manuela Jopen  
Michael Kowalik  
Ilka Petermann  
Kevin Cohrs (TÜV Rheinland)  
Jens-Uwe Schmollack  
(TÜV Rheinland)  
Matthias Englert (Öko-Institut)  
Anna Kopp (Öko-Institut)  
Christoph Pistner (Öko-Institut)  
Philipp Sauter (MPIL)  
Xue Zhou Jin (KIT)  
Dirk Radloff (KIT)

Juli 2026

#### **Anmerkung:**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Eigenforschungsvorhaben wurde mit Förderung des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) im Rahmen des Fachprogramm Fusion 2040 – Forschung auf dem Weg zum Fusionskraftwerk unter dem Kennzeichen 13F1002A-D durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der Organisationen wieder und muss nicht mit der Meinung des BMFTR übereinstimmen.

**Deskriptoren**

Fusion, Fusionsanlagen, Fusionskraftwerke, ionisierende Strahlung, Kernfusion, Laserfusion, Magnetfusion, Regulatorik, Regulierung, Strahlenschutz

## Kurzfassung

Der vorliegende Statusbericht stellt den Stand der Arbeiten im Pilotprojekt Regulatorik für Fusionsanlagen (ReFus) zum Zeitpunkt Juni 2026 dar. Er wurde von den Verbundpartnern (GRS, TÜV Rheinland, Öl, MPIL) und dem Unterauftragnehmer KIT erstellt. Die assoziierten Partner liefern im Verlauf des Projekts Input, waren aber an der Berichtserstellung des Statusberichts nicht beteiligt.

Der Statusbericht soll Interessierten die Möglichkeit eröffnen, die bisherigen Ergebnisse bis zum **31.10.2026** zu kommentieren, um diese Kommentare im weiteren Projektverlauf und bei der Erstellung des Abschlussberichts zu berücksichtigen. Die Autorinnen und Autoren des Statusberichts bitten darum, dazu die Kommentierungstabelle im Anhang B zu verwenden. Die Kommentare werden zusammen mit der Angabe, ob und wie sie verwendet wurden, separat veröffentlicht. Ein finaler Abschlussbericht wird nach Ende der Projektlaufzeit im zweiten Quartal 2027 veröffentlicht.

Das Pilotprojekt ReFus hat das Ziel, den Status-Quo der rechtlichen und technischen Regulatorik von Fusionsanlagen in Deutschland zu ermitteln, Lücken zu identifizieren, Wege zur Einbindung von Fusionsanlagen in die bestehende Gesetzessystematik bzw. die Erstellung eines eigenen Regulierungsregime aufzuzeigen und ein Konzept für den Aufbau eines technischen Regelwerks zu entwickeln.

Die Analyse des Status-Quo der rechtlichen Regulierung hat gezeigt, dass Fusionsanlagen bereits aktuell durch das Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) als Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung, konkret als Plasmaanlagen erfasst werden. Demnach besteht bei Vorliegen der im StrlSchG genannten Voraussetzungen ein Recht auf die Erteilung einer Errichtungs- bzw. Betriebsgenehmigung. Durch die Anforderungen aus dem StrlSchG und der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) ergibt sich ein zielorientierter regulatorischer Ansatz, der dem Antragsteller die technische Umsetzung zur Erfüllung dieser Ziele überlässt. Dabei ist entsprechend der Anforderung des StrlSchG zu zeigen, dass Ausrüstung vorhanden und Maßnahmen getroffen sind, die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderlich sind, um die Schutzvorschriften einzuhalten.

Um Anlagen, die unter die Regulierung des StrlSchG bzw. Atomgesetz (AtG) fallen, bezüglich ihres radiologischen Gefährdungspotentials vergleichen zu können, wurde eine Metrik entwickelt. Der Vergleich hochradioaktiver Quellen bzw. von existierenden

Anlagen mit Literaturwerten von geplanten Fusionsanlagen bzw. Fusionskraftwerkskonzepten zeigt, dass das radiologische Gefährdungspotential dieser Fusionsanlagen am oberen Ende bzw. über dem Gefährdungspotential von nach StrlSchG regulierten Anlagen liegt und teilweise das von Kernspaltungsforschungsreaktoren erreicht, jedoch unterhalb des Gefährdungspotentials von Kernkraftwerken liegt.

Aktuell gibt es in Deutschland kein Fusions-spezifisches technisches Regelwerk, das die nach StrlSchG gemäß Stand von Wissenschaft und Technik notwendige Ausrüstung bzw. die Maßnahmen konkretisiert. Es wird deshalb vorgeschlagen, für zukünftige Fusionsanlagen eine Checkliste für die Antragsstellung zur Errichtungs- bzw. Betriebsgenehmigung zu erstellen, die sich an der sogenannten Beschleunigerliste orientiert. Ein erster Entwurf für diese Checkliste soll in der nächsten Phase des Projekts erstellt werden. Außerdem wurde in der ersten Projektphase ein Vorschlag für einen gestuften Ansatz für das technische Regelwerk erarbeitet. Im weiteren Projektverlauf sollen insbesondere die Kriterien für die Stufung der Anforderungen in diesem Ansatz weiter untersucht und spezifiziert werden.

Eine Auswertung der wissenschaftlichen Literatur zum radioaktiven Inventar und den erwarteten Abfallmengen zukünftiger Fusionskraftwerke zeigt, dass mit signifikanten Mengen schwach- und mittelradioaktiven Abfällen während des Betriebs und beim Rückbau zu rechnen ist. Dieser müsste nach deutschem Recht geologisch endgelagert werden. Erklärtes Ziel der aktuellen Fusionsforschung ist es, diese Abfallmengen zu minimieren.

Die Fusion besitzt ferner verschiedene Eigenschaften (Tritiuminventar, Dual-Use-Knowhow, starke Neutronenquelle), die dazu führen, dass auch Aspekte der Nichtweiterverbreitung von Kernwaffen berücksichtigt werden müssen.

Um für zukünftige Genehmigungsverfahren gerüstet zu sein, ist es notwendig, dass Simulationscodes für die Nachweisführung geeigneter Sicherheitsmaßnahmen, die in ein entsprechendes Sicherheitskonzept eingebettet sind, vorhanden und qualifiziert sind. Dafür wurden vorhandene Codes ermittelt und Lücken bzw. Weiterentwicklungsbedarf aufgezeigt.

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                                |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
|          | <b>Kurzfassung.....</b>                                                        | <b>I</b>  |
| <b>1</b> | <b>Motivation.....</b>                                                         | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Einführung .....</b>                                                        | <b>5</b>  |
| 2.1      | Berücksichtigte Anlagenkonzepte .....                                          | 5         |
| 2.2      | Struktur und Ablauf des Projekts.....                                          | 6         |
| 2.3      | Bedarfe der Stakeholder .....                                                  | 9         |
| 2.4      | Workshop .....                                                                 | 11        |
| <b>3</b> | <b>Regulatorik von Fusionsanlagen in Deutschland .....</b>                     | <b>15</b> |
| 3.1      | Aufbau des deutschen Regelwerks.....                                           | 15        |
| 3.2      | Gesetze und Verordnungen.....                                                  | 16        |
| 3.2.1    | Genehmigungen .....                                                            | 16        |
| 3.2.2    | Strahlenschutzrechtliche Genehmigungsvoraussetzungen .....                     | 17        |
| 3.2.3    | Strahlenschutzrechtlich zuständige Behörden .....                              | 20        |
| 3.2.4    | Stilllegung und Entsorgung .....                                               | 21        |
| 3.2.5    | Sonstige rechtliche Aspekte.....                                               | 22        |
| 3.3      | Untergesetzliches Regelwerk .....                                              | 23        |
| 3.3.1    | Allgemeine Verwaltungsvorschriften .....                                       | 23        |
| 3.3.2    | Bekanntmachungen des BMUKN .....                                               | 23        |
| 3.3.3    | Leitlinien und Empfehlungen.....                                               | 25        |
| 3.3.4    | Regeln des KTA .....                                                           | 25        |
| 3.3.5    | Industrienormen.....                                                           | 26        |
| 3.4      | Praktische Anwendung des bestehenden Rechts: Beispiel<br>Wendelstein 7-X ..... | 28        |
| 3.5      | Einfluss von europäischem und internationalem Recht auf Deutschland .          | 32        |
| 3.5.1    | Euratom .....                                                                  | 33        |
| 3.5.2    | Europäische Union .....                                                        | 34        |
| 3.5.3    | OECD/NEA.....                                                                  | 35        |

|          |                                                                                        |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.5.4    | IAEA .....                                                                             | 36        |
| 3.5.5    | Sonstige internationale Organisationen und Institutionen.....                          | 38        |
| <b>4</b> | <b>Übersicht über die Fusionsregulierung in ausgewählten Ländern ....</b>              | <b>41</b> |
| 4.1      | USA.....                                                                               | 41        |
| 4.2      | Vereinigtes Königreich .....                                                           | 42        |
| 4.3      | Frankreich.....                                                                        | 44        |
| 4.4      | Japan.....                                                                             | 46        |
| <b>5</b> | <b>Gefährdungspotential.....</b>                                                       | <b>49</b> |
| 5.1      | Physikalische Basis des Gefährdungspotentials, radioaktives Inventar....               | 50        |
| 5.1.1    | Direktstrahlung .....                                                                  | 51        |
| 5.1.2    | Tritium .....                                                                          | 51        |
| 5.1.3    | Aktivierte und kontaminierte Materialien .....                                         | 53        |
| 5.2      | Strahlenschutz.....                                                                    | 57        |
| 5.3      | Sicherheit .....                                                                       | 59        |
| 5.3.1    | Möglichkeiten der Mobilisierung von radioaktiven Inventaren.....                       | 59        |
| 5.3.2    | Vergleich mit anderen strahlenschutzregulierten und kerntechnischen<br>Anlagen .....   | 61        |
| 5.3.3    | Quellterme .....                                                                       | 65        |
| 5.4      | Stilllegung und Entsorgung .....                                                       | 65        |
| 5.4.1    | Abfallklassifikation und -inventare .....                                              | 66        |
| 5.4.2    | Zwischen- und Endlagerung in Deutschland .....                                         | 72        |
| 5.4.3    | Zwischen- und Endlagerung in anderen Ländern.....                                      | 74        |
| 5.5      | Sicherung .....                                                                        | 78        |
| 5.6      | Nichtverbreitung .....                                                                 | 78        |
| 5.6.1    | Fusion als hochenergetische Neutronenquelle .....                                      | 78        |
| 5.6.2    | Tritium und Tritiumbrüten .....                                                        | 81        |
| 5.6.3    | Inertialfusion und Kernwaffenentwicklung .....                                         | 82        |
| <b>6</b> | <b>Simulationscodes .....</b>                                                          | <b>85</b> |
| 6.1      | Kernphysikalische Prozesse: Aktivierung, Neutronentransport und<br>Tritiumbrüten ..... | 89        |

|          |                                                                                      |            |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.2      | Tritiumverhalten .....                                                               | 90         |
| 6.3      | Staub- und Korrosionsproduktbildung .....                                            | 90         |
| 6.4      | Plasmainstabilitäten .....                                                           | 91         |
| 6.5      | Materialalterung .....                                                               | 91         |
| 6.6      | Chemische Reaktionen und Freisetzung .....                                           | 91         |
| 6.7      | Ausbreitung und Strahlenexposition .....                                             | 92         |
| 6.8      | Anpassung von AC <sup>2</sup> für Fusionsanwendungen .....                           | 92         |
| 6.9      | Schlussfolgerung .....                                                               | 93         |
| <b>7</b> | <b>Weiterentwicklung der Regulatorik von Fusionsanlagen in<br/>Deutschland .....</b> | <b>95</b>  |
| 7.1      | Gesetze und Verordnungen .....                                                       | 95         |
| 7.1.1    | Aufnahme der Fusion in das AtG .....                                                 | 95         |
| 7.1.2    | Fortentwicklung des StrlSchG .....                                                   | 96         |
| 7.1.3    | Entwicklung eines Fusionsgesetzes .....                                              | 97         |
| 7.1.4    | Sonstiger Änderungsbedarf .....                                                      | 98         |
| 7.2      | Untergesetzliches Regelwerk .....                                                    | 99         |
| 7.2.1    | Schutzziele .....                                                                    | 99         |
| 7.2.2    | Gestufte Anwendung des Regelwerks .....                                              | 100        |
| 7.2.3    | Gremienstruktur .....                                                                | 104        |
| 7.2.4    | Normung .....                                                                        | 106        |
|          | <b>Danksagung .....</b>                                                              | <b>107</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis .....</b>                                                    | <b>109</b> |
|          | <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>                                                   | <b>129</b> |
|          | <b>Tabellenverzeichnis .....</b>                                                     | <b>131</b> |
|          | <b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>                                                   | <b>133</b> |
| <b>A</b> | <b>Poster .....</b>                                                                  | <b>141</b> |

|          |                                                                            |
|----------|----------------------------------------------------------------------------|
| <b>B</b> | <b>Vorlage zur Einreichung von Kommentaren zum Statusbericht ..... 145</b> |
|----------|----------------------------------------------------------------------------|

# 1 Motivation

Die ersten Experimente mit dem Ziel der Entwicklung der Fusion hin zu einem stromerzeugenden Kraftwerk starteten bereits in den 1950er Jahren und haben sich im Bereich der Grundlagenforschung seither stetig weiterentwickelt. Im Dezember 2022 wurde bekannt gegeben, dass es im US-amerikanischen Lawrence Livermore National Laboratory erstmals gelungen sei, bei einem Laserfusionsexperiment mehr Energie zu gewinnen, als zuvor als Laserenergie in das System eingebracht wurde /NIC 24/. Mittlerweile wurde dieses Experiment mehrfach reproduziert und der Energiegewinn gesteigert /WUR 25/. Auch im Bereich der Magneteinschlussfusion wurden zuletzt längere Plasmaeinschlusszeiten und verbesserte Werte des Tripleprodukts erreicht /MPI 25/.

Diese Entwicklungen sowie die umfangreichen staatlichen Fördermaßnahmen der letzten Jahre in verschiedenen Ländern für die Magnet- und Laserfusionsforschung zeigen nach /BMBF 23/ das Potential, den in den nächsten Jahrzehnten stark anwachsenden weltweiten Energiebedarf u. a. auch mit Hilfe von Fusionsenergie befriedigen zu können.

Mit dem Programm „Fusion 2040 – Forschung auf dem Weg zum Fusionskraftwerk“ /BMBF 24/ verfolgt das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) das Ziel, technologieoffen grundlegende Voraussetzungen für den Bau und Betrieb von Fusionsanlagen (Magnetfusion, Trägheitsfusion) zu schaffen. Daraus werden in /BMBF 24/ vier strategische Ziele abgeleitet:

- Beitrag zur Energiesouveränität leisten,
- Fusionstechnologie in die Anwendung bringen, Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands in den Fusionstechnologien stärken,
- Technologische Souveränität in der Fusion sichern und
- Chancen des technologischen Wandels für Wirtschaft und Gesellschaft nutzen.

Als ein wichtiger Indikator für die Zielerreichung der Energiesouveränität wird der Fortschritt in der nationalen Regulierung von Fusionsanlagen gesehen. Hierzu müssen nach /BMBF 24/ die technischen und rechtlichen regulatorischen Rahmenbedingungen parallel zu den technologischen Aktivitäten mitentwickelt und aufgebaut werden, um für die interessierten Unternehmen und Investoren Rechts- und Planungssicherheit zu schaffen.

Laut /BMBF 24/ existieren derzeit in Deutschland keine einschlägigen und passfähigen Regularien für den Bau, den Betrieb und den Rückbau von Fusionskraftwerken (einschließlich Demonstrationsanlagen). Diese Regularien müssten frühzeitig geschaffen bzw. bestehende Regelwerke angepasst sowie Grenzwerte und Klassifizierungen verbindlich festgelegt werden.

Kernkraftwerke unterliegen in Deutschland rechtlich insbesondere dem Atomgesetz (AtG) und den auf dem Atomgesetz beruhenden Rechtsverordnungen. Den technischen regulatorischen Rahmen schaffen unter anderem die Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke inkl. ihrer Interpretationen /BMUB 15/ sowie das Regelwerk des kerntechnischen Ausschusses. Dieser Rahmen bildet auch die internationalen Anforderungen an Kernkraftwerke ab. Für Fusionsanlagen existiert derzeit weder ein vergleichbares nationales technisches Regelwerk noch entsprechende internationale Anforderungen. Auch scheidet das AtG in seiner aktuellen Form als rechtliche Grundlage für die Regelung der Errichtung und des Betriebs von Fusionsanlagen aus, da es in diesem Zusammenhang von Kernbrennstoffen ausgeht, unter dessen Definition die in Fusionsanlagen typischerweise zu verwendenden Brennstoffe nicht fallen. Es enthält aber u. a. Vorschriften, die auch auf Fusionsanlagen anzuwenden sind bzw. deren Anwendung ggf. sachdienlich sein kann. Bisherige Forschungsanlagen in Deutschland wie der Tokamak ASDEX Upgrade oder der Stellarator Wendelstein 7-X wurden nach Strahlenschutzrecht genehmigt.

Vor diesem Hintergrund verfolgt das ReFus-Vorhaben das Ziel, den Status Quo sowie bestehende Lücken im Hinblick auf die technische und rechtliche regulatorische Situation für Fusionsanlagen zu analysieren. Ausgehend vom geltenden Atom- und Strahlenschutzrecht sowie von den Ergebnissen einer Analyse der Bedarfe der Industrie an die Fusions-Regulierung soll die Möglichkeit zur Einbindung der Fusionsanlagen in die bestehende Gesetzessystematik, insbesondere des Strahlenschutzes, oder die Entwicklung eines eigenen Regulierungsregimes unter Berücksichtigung von Übergangsregelungen auf dem Weg von Versuchsanlagen zu einem Kraftwerk ermittelt werden. Der Begriff der Fusionsanlage umfasst im vorliegenden Bericht dabei grundsätzlich sowohl experimentelle Versuchsanlagen, Demonstrationsanlagen, aber auch vollständige Fusionskraftwerke.

Um angemessene regulatorische Anforderungen an Fusionsanlagen stellen zu können, ist es notwendig, das radiologische Gefährdungspotential verschiedener Anlagen und Umgänge, die gemäß StrlSchG oder auch AtG reguliert werden, zu vergleichen. Ein

solcher Vergleich kann auf dem mobilisierbaren Inventar aufbauen, das in solchen Anlagen vorhanden ist bzw. mit dem umgegangen wird. Daten dafür liegen für hochradioaktive Quellen wie auch für verschiedene kerntechnische Einrichtungen (Forschungsreaktoren, Kernkraftwerke, Castoren) vor. Diese sollen mit dem Gefährdungspotential von Fusionsanlagen verglichen werden, wobei aktuell noch keine vollständige, technologieumfassende Übersicht zu solchen Anlagen möglich ist. Vergleiche in der Vergangenheit haben bereits gezeigt, dass bei Fusionsanlagen ein Inventar mit einer deutlich niedrigeren Radiotoxizität und geringeren Halbwertszeiten zu erwarten ist als bei Kernkraftwerken /RAE 16/. Es wird deshalb abgeschätzt werden, wie Fusionsanlagen bezüglich ihres radiologischen Gefährdungspotentials im Vergleich zu anderen Anlagen einzuordnen sind.

Der Unterschied im radiologischen Inventar wird auch bezüglich der Entsorgung wie auch der Nichtverbreitung zu berücksichtigen sein. Ein weiterer Unterschied ergibt sich durch den Dual-Use-Charakter bestimmter Fusionstechnologien, wie z. B. bei der Anreicherung von Li-6 oder des für die Laserfusion notwendigen Knowhows. Deshalb werden auch die Besonderheiten der Fusionstechnologien bezüglich dieser Aspekte untersucht und Lücken identifiziert sowie ggf. Empfehlungen zum regulatorischen Umgang mit diesen Besonderheiten gegeben.

Um die für die Regelwerksentwicklung relevanten sicherheitstechnischen Fragestellungen untersuchen zu können, sind Sicherheitsanalysen der Anlagenkonzepte unerlässlich, welche die Existenz und Anwendung von Simulationscodes bedingen. Im Rahmen dieses Vorhabens sollen daher die sich aus den Regelwerkskonzepten ergebenden Anforderungen an Simulationscodes sowie deren aktuelle Verfügbarkeit und der bestehende Forschungs- und Entwicklungsbedarf ermittelt werden.

Aus der Analyse des bisherigen Regelwerks für Fusionsanlagen und dem Vergleich des Gefährdungspotentials von Fusionsanlagen mit anderen nach StrlSchG oder AtG genehmigten Anlagen resultiert der Vorschlag für einen gestuften Ansatz zur Weiterentwicklung der Regulatorik für Fusionsanlagen.



## 2 Einführung

### 2.1 Berücksichtigte Anlagenkonzepte

Als Grundlage für die in diesem Vorhaben angestellten Betrachtungen dienen Anlagenkonzepte für Fusionsanlagen (von experimentellen Anlagen bis hin zu Kraftwerken) mit magnetisch eingeschlossenem Fusionsplasma (kurz: Magnetfusion bzw. magnetic confinement fusion, MCF) und mit Trägheitseinschluss (kurz: Trägheits- oder Laserfusion bzw. inertial confinement fusion, ICF). Zur Magnetfusion und deren zwei dominierenden Konzepten, dem Tokamak und dem Stellarator, wurden in den vergangenen Jahrzehnten bereits zahlreiche und umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchgeführt. Diesbezüglich existiert weltweit eine Vielzahl von Experimentieranlagen, einige Demonstrationsanlagen sind ebenfalls geplant. Vielfach wurde sich bereits vertieft mit Fragen der Sicherheit von Fusionsanlagen mit magnetischem Einschluss auseinandergesetzt (z. B. /CAR 22/, /DON 23/, /EUR 21/). Dementsprechend liegen zur Magnetfusion derzeit die umfangreichsten Informationen vor. Die Forschung und Entwicklung zur Laserfusion hat insbesondere seit Beginn der 2020er Jahre eine zunehmende Dynamik und Aufmerksamkeit erhalten, allerdings steht die technische Reife gegenwärtig noch hinter der Magnetfusion zurück. Veröffentlichungen zur technischen Ausgestaltung sowie zu Sicherheitsfragen der Laserfusion (z. B. /BAT 23/, /LIT 21/) weisen daher in der Regel eine geringere Detailtiefe auf, als dies bei der Magnetfusion der Fall ist.

Anlagenkonzepte privater Fusionsunternehmen in Deutschland und die von diesen Unternehmen durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten fokussieren sich aktuell auf die Magnetfusion nach dem Stellarator-Prinzip (/LIO 25/, /GAU 25/) und die Laserfusion (/RUH 22/, /DIT 23/). Private Firmen im Ausland entwickeln neben diesen Anlagenkonzepten auch beispielsweise Tokamaks /CRE 20/, die möglicherweise in Deutschland gebaut werden könnten.

Gegenwärtig liegen für Fusionskraftwerke noch keine detaillierten Designs vor, da in verschiedenen Bereichen noch Entwicklungsbedarfe bestehen. Bei allen aktuell in Deutschland verfolgten Anlagenkonzepten sollen Tritium und Deuterium als Fusionsbrennstoffe verwendet werden. Da Tritium nur in sehr geringen Mengen natürlich vorkommt, wird es in zukünftigen Fusionskraftwerken notwendig sein, eine kontinuierliche Tritiumerzeugung durch sogenanntes Brüten sicherzustellen. Entsprechend werden solche Fusionskraftwerke als Brutblankets bezeichnete Wandstrukturen besitzen, in denen aus Lithium

Tritium erbrütet werden soll. Um eine ausreichend hohe Brutrate (Tritium breeding ratio,  $TBR > 1$ ) zu erreichen, wird auch die Integration von sogenannten Neutronenmultiplikatoren (z. B. Beryllium oder Blei) im Brutblanket notwendig sein. Diese sollen die bei der Fusionsreaktion freiwerdenden Neutronen durch eine Kernreaktion vervielfachen, so dass im Brutblanket eine höhere Wahrscheinlichkeit für das Erbrüten von neuem Tritium pro einem in einer Fusionsreaktion freigesetzten Neutron erreicht wird.

Neben der Tritium-Bruttechnologie bzw. dem vollständigen Tritiumkreislauf bestehen auch in Bezug auf die Auswahl der Materialien für Strukturen im Bereich der Reaktionskammer, in der die Fusionsreaktion stattfindet und in deren Umgebung eine sehr starke Neutronenstrahlung herrscht, noch offene Fragen. Dies umfasst Fragestellungen zur Materialschädigung und Aktivierung durch die Neutronenstrahlung sowie zur Staubbildung durch die direkte Wechselwirkung zwischen Plasma und dem Plasma zugewandten Oberflächen. Neben Sicherheitsfragen hängen von diesen Aspekten auch mögliche Konzepte für die Wiederverwertung von Materialien und die Entsorgung radioaktiver Abfälle sowie Aspekte der Nichtverbreitung ab.

Aufgrund der noch bestehenden Entwicklungsbedarfe und der damit verbundenen Unsicherheiten für die in Deutschland konkret verfolgten Anlagenkonzepte basieren die folgenden Auswertungen auf generischen Abschätzungen und Angaben aus der Literatur, die sich vielfach auf international verfolgte Anlagenkonzepte wie ITER und DEMO beziehen.

Die in diesem Projekt durchgeführten Arbeiten schließen Fusionskonzepte aus, die spaltbares Material – Thorium oder Uran – enthalten, soweit es sich dabei nicht nur um Spurenelemente in anderen Materialien handelt. Dabei handelt es sich um Konzepte, in denen z. B. Uran als Neutronenmultiplikator verwendet würde oder die Neutronen der Fusionsreaktion zu gezielten Kernreaktionen in unterkritischen Konfigurationen von Kernbrennstoffen oder zum Erbrüten von Kernbrennstoffen verwendet würden (siehe z. B. /BET 79/).

## **2.2 Struktur und Ablauf des Projekts**

Das im Rahmen des Fachprogramms Fusion 2040 – Forschung auf dem Weg zum Fusionskraftwerk – vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

(BMFTR) geförderte „Pilotprojekt zur Regulatorik für Fusionsanlagen (ReFus)“ wird von den Verbundpartnern

- Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
- TÜV Rheinland Industrie Service GmbH
- Öko-Institut e.V.
- Max-Planck-Institut für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht

Und, als Unterauftragnehmer der GRS, dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) durchgeführt. Das Projekt wird vom Projektträger der VDI Technologiezentrum GmbH (VDI TZ) betreut.

Am Projekt beteiligen sich die Firmen

- Focused Energy
- Marvel Fusion
- Proxima Fusion GmbH
- Framatome GmbH
- Siemens Energy
- Bilfinger Nuclear & Energy Transition GmbH
- Commonwealth Fusion Systems
- RWE Nuclear GmbH

als assoziierte Partner, um die Verbundpartner insbesondere im Hinblick auf die Erhebung von Daten zu unterstützen.

Im Projekt werden in parallellaufenden Arbeitspaketen die rechtliche und technische Regulierung untersucht, Lücken identifiziert und Vorschläge für mögliche Weiterentwicklungen gemacht sowie das Projekt gesteuert und die Kommunikation innerhalb und außerhalb des Projekts durchgeführt.

Die Verbundpartner führen die Arbeiten im Projekt eigenverantwortlich durch. Die Verbundpartner unterliegen dabei keiner Weisung durch den Projektförderer oder die assoziierten Partner.

Da die Regulatorik von Fusionsanlagen auch wesentlich das Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) betrifft, wird es regelmäßig über den Fortschritt der Arbeiten informiert.

In einem weitergehenden Rahmen sind neben den assoziierten Partnern, auch das BMFTR, BMUKN, das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) und das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) sowie der Projektträger VDI TZ an quartalsweisen Verbundtreffen beteiligt. Bei diesen Treffen präsentieren die Verbundpartner den aktuellen Stand und die jeweils aktuellen Ergebnisse des Projekts, holen Feedback der Teilnehmenden ein und stellen die nächsten geplanten Schritte vor. Insbesondere die Präsenztreffen zu Beginn des Projekts (Kick-Off-Treffen in Köln) und die beiden Projektmeetings in Heidelberg und Garching wurden zu intensiven Diskussionen genutzt.

Alle zwei Wochen finden online Jour Fixe-Besprechungen zwischen den Verbundpartnern, dem BMFTR, BMUKN, VDI TZ und BASE statt. Dabei berichten die Verbundpartner über den aktuellen Stand der Arbeiten.

Im Januar 2026 fand in Garching ein Workshop zu den Arbeiten des Projekts statt, zu dem die Fachöffentlichkeit eingeladen war. Neben den Ministerien und Bundesbehörden waren auch Landesministerien bzw. -behörden, Forschungsorganisationen, Industrie- und Versicherungsunternehmen eingeladen. Mit der Veröffentlichung dieses Statusberichts wird auch allen weiteren Stakeholdern die Gelegenheit gegeben, sich über die Arbeiten in ReFus zu informieren und die bisherigen Projektergebnisse zu kommentieren.

Der bisherige Beitrag der assoziierten Partner bestand im Wesentlichen aus der Beschreibung ihrer Bedarfe an eine Regulierung, der in diesem Bericht in Abschnitt 2.3 dokumentiert ist. Die Bedarfe wurden beim Kick-Off-Meeting und durch separate Interviews mit den assoziierten Partnern ermittelt. Neben den Bedarfen der Industrie wurden auch solche von Landesbehörden ermittelt, die für die Aufsicht über Fusionsanlagen zuständig sind bzw. sein werden.

Auch mit ausländischen Organisationen und Behörden wurden das Vorgehen in den jeweiligen Ländern und die bisherigen Ergebnisse von ReFus diskutiert. Der Austausch fand dabei sowohl bei internationalen Veranstaltungen und Konferenzen als auch bilateralen Treffen statt. Dabei fand ein Austausch insbesondere mit Vertreterinnen und Vertretern von Organisationen aus China, Frankreich, Spanien, Japan, UK, Europa (EUROfusion) und den USA, sowie der IAEA statt.

Ergebnisse von ReFus wurden bei verschiedenen Konferenzen und internationalen Meetings präsentiert: 2025 Symposium on Fusion Engineering, USA; 69th IAEA General Conference, Österreich; 30th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2025), China; IAEA Technical Meeting on Experience in Codes and Standards for Fusion Technology, Österreich; 7th FORUMFUSION, Deutschland; binding.energy 2026, Deutschland; CATF Fusion Safety and Regulation Course, Spanien; Statustreffen Fusion, Deutschland; IAEA Consultancy Meeting to Develop Fusion Safety Standard Roadmap, Deutschland; INMM Annual Conference, USA; VDI Rückbaukonferenz, Deutschland. Zwei Poster sind bei der SOFT 2026, Frankreich akzeptiert, ein Journalartikel befindet sich aktuell im Reviewprozess.

### **2.3 Bedarfe der Stakeholder**

Die Bedarfe der Industrie und von Startup-Unternehmen für eine rechtliche und technische Regulatorik von Fusionsanlagen wurden anhand verschiedener Sachgebiete (insb. internationale Harmonisierung, rechtlicher Rahmen und Einordnung in das bestehende Rechtsregime, Definition von Fusionsanlagen, Umgang mit radioaktiven Stoffen sowie Abfall und Entsorgung, nukleare Nichtverbreitung, Ausbildungsbedarf) von Mitarbeitenden aus der Industrie und von Startup-Unternehmen im Rahmen des gemeinsamen Kickoff-Meetings zum ReFus-Vorhaben diskutiert. Darauf aufbauend wurden vertiefte Fragen formuliert und in Interviews bzw. schriftlicher Form durch die assoziierten Partner beantwortet. Im Folgenden wird eine Zusammenfassung diskutierter Themen mit Meinungen und Ansichten eben dieser wiedergegeben.

Übereinstimmend wurde es als relevant für ein zukunftsfähiges Rechtsregime für Fusionsanlagen erachtet, dass grundlegende Rahmenbedingungen entwickelt würden, die den gesamten Lebenszyklus der Anlagen berücksichtigten – von der Planung und Inbetriebnahme über Sicherheit und Wartung im Betrieb bis hin zu Stilllegung und Rückbau, dem Umgang mit radioaktiven Reststoffen sowie der Zwischen- und Endlagerung

radioaktiver Abfälle. Dabei spiele der Abgleich nationaler und internationaler Anforderungen eine zentrale Rolle; darüber hinaus könne eine weitreichende Harmonisierung von Vorschriften und Normen entscheidend für einen schnellen Roll-out der Technologie sein und weltweite Marktzugänge langfristig sichern.

Wesentlich sei auch die Übertragung von Wissen und Erfahrungen aus etablierten Bereichen wie dem Strahlenschutz – etwa aus der Beschleunigertechnologie oder dem Umgang mit Tritium – sowie aus der Kerntechnik und dem Betrieb nicht-nuklearer Anlagen. Gleichzeitig müsse das regulatorische Rahmenwerk technologieoffen gestaltet sein, sodass alle Fusionsansätze gleichermaßen berücksichtigt werden könnten. Dabei sei die zeitliche Dimension bedeutsam: Nationale Regulierung könne häufig deutlich schneller umgesetzt werden als internationale oder europäische Harmonisierung, bliebe aber dennoch eingebettet in den längerfristigen Prozess internationaler Abstimmung.

Aktuell erscheine die Harmonisierung in bestimmten Themenfeldern besonders zielführend: Dazu gehöre die Einordnung von Fusionsanlagen in bestehende Rechtsregime. Um international abgestimmt vorgehen zu können, solle auch in Deutschland das Strahlenschutzrecht als Grundlage herangezogen werden. Ebenso sei die Festlegung klarer Schutzziele und eine zielorientierte Regulierung notwendig, die unterschiedliche Risikoprofile von Kernspaltung und Kernfusion anerkenne. Ein auf Schutzziele und Grenzwerten basierender Ansatz ermögliche dabei eine technologieoffene Regulierung, die Innovation fördere, ohne den Sicherheitsstandard zu kompromittieren.

In Bezug auf besonders relevante rechtliche Rahmenbedingungen sei eine klare gesetzliche Definition von „Fusionsanlagen“ maßgeblich. Dabei sei ein eigener Rechtsrahmen erforderlich, der sich von dem für kernspaltungs-basierte Anlagen unterscheide. Das bestehende Strahlenschutzrecht biete hierfür bereits eine tragfähige Basis, da in Fusionsanlagen keine nuklearen Kettenreaktionen abliefen und keine oder eher geringe Mengen an langlebigen Spalt- oder Aktivierungsprodukten entstünden. Kurzfristig sei eine Entscheidung notwendig, dass das Atomrecht künftig nicht als Grundlage für die Regulierung von Fusionsanlagen dienen werde. Gleichzeitig sollten Rücklagen für die spätere Entsorgung frühzeitig adressiert werden.

Wesentlich sei außerdem Transparenz über Abläufe, Zuständigkeiten und involvierte Verfahren – beispielsweise nach BImSchG, UVPG oder anderem Recht – sowie über Möglichkeiten einer behördlichen Bündelung von Verfahren. Ein regelmäßiger Austausch von Fusionsanlagenentwicklern mit den zuständigen Genehmigungsbehörden

solle aktiv gesucht werden. Während das Atomrecht etablierte Austauschmechanismen auch zwischen Bund und Ländern biete, müsse Vergleichbares auch für den Bereich der Fusion geschaffen werden. Da im Strahlenschutz- und Atomrecht eine zuständige Landesbehörde eindeutig definiert sei, wäre bei der möglichen Einführung eines neuen „Fusionsgesetzes“ zudem eine zuständige Landesbehörde neu zu bestimmen.

Mittelfristig solle eine nationale Regulierung für Fusionsanlagen aufgebaut werden, während langfristig ein international harmonisierter Rechtsrahmen anzustreben sei. Die Festlegung auf das Strahlenschutzrecht könne dabei als erster Schritt dienen. Internationale Entwicklungen sollten eng verfolgt und bei Bedarf berücksichtigt werden; ein deutsches Regelwerk könne perspektivisch sogar als Blaupause für eine europäische Harmonisierung dienen.

Darüber hinaus seien Fragen der Geringfügigkeitsschwellen zu klären, insbesondere bei der Festlegung von Schwellenwerten, die bestimmen, ob in Genehmigungsverfahren bestimmte Analysen erforderlich seien. Ebenfalls zu prüfen seien Haftungsfragen und das Gefährdungspotenzial von Fusionsanlagen. Auf internationaler Ebene, etwa bei der OECD/NEA, werde hierzu bereits diskutiert, bislang jedoch ohne Konsens. Auch das Thema Versicherung stelle eine Herausforderung dar: Während beispielsweise die Atomhaftung in den USA nicht auf Fusionskraftwerke anwendbar sei, nenne das deutsche Atomgesetz zwar Kernvereinigungsvorgänge ausdrücklich, doch der deutsche Kernversicherungspool schließe Fusionsanlagen laut Satzung aus.

## **2.4 Workshop**

Vom 21. bis 22.01.2026 fand ein Workshop zum Pilotvorhaben zur Regulatorik für Fusionsanlagen (ReFus) bei der GRS in Garching bei München statt.

Am Workshop, der am Mittag des 21.01. startete, nahmen rund 90 Personen aus Wissenschaft, Landesbehörden, Bundesministerien, Industrie, den Startups und Sachverständigenorganisationen sowie Versicherungsgesellschaften in Präsenz und online teil. Die Themen waren vielfältig und reichten von einer Vorstellung der aktuellen Projektergebnisse von ReFus, einer Einordnung der aktuellen Entwicklungen in der Fusionsforschung über Erfahrungen mit der Genehmigung und Aufsicht, Strahlenschutzaspekte bis hin zu Fragestellungen der Entsorgung.

Der Workshop wurde mit Übersichtsvorträgen zum ReFus-Projekt und zusammenfassenden Darstellungen der rechtlichen und technischen Regulierung von Fusionsanlagen eingeleitet.

Im Rahmen der Arbeiten zur rechtlichen Regulierung wurden die bislang erarbeiteten und ausgewerteten Bedarfe von Industrie und Startups für ein Rechtsregime für Fusionsanlagen, von der Designphase bis hin zu Aspekten der Entsorgung/Endlagerung, vorgestellt. Die Fusionsregulierung wurde sowohl in einem internationalen Kontext dargestellt als auch in ihrer Einordnung in das deutsche Rechtsregime (insb. Strahlenschutzrecht) erörtert. Vor- und Nachteile eines eigenständigen "Fusionsgesetzes" wurden ebenfalls kurz umrissen.

Der Vortrag zum Konzept eines technischen Regelwerkes ordnete die Systematik für eine Regulierung von Fusionsanlagen in bestehende, etablierte Konzepte ein und zeigte anhand von Schwellenwerten (Neutronenfluss, Freigabewerte, thermische Leistung) ein mögliches Schema für eine (fusionsspezifische) Regulierung auf. Ein weiterer Aspekt befasste sich mit zu erwartenden radioaktiven Abfällen aus Fusionsanlagen und zeigte deren theoretische Akzeptabilität in verschiedenen Endlagern auf.

Des Weiteren stellten Teilnehmende verschiedener Organisationen und Einrichtungen sachspezifische Aspekte und aktuelle Forschungsschwerpunkte zu Fusionsanlagen vor.

Der Beitrag 'From Tritium Laboratory to Tritium Fuel Cycle' (Institute for Astroparticle Physics, Tritium Laboratory Karlsruhe) gab einen Überblick über chemisch-physikalische Eigenschaften des Wasserstoffisotops und bislang bekannte Tritium-Signaturen in der Umwelt. Vor dem Hintergrund der Notwendigkeit eines geschlossenen Tritiumkreislaufs wurden Multibarrieren-Konzepte von Tritiumlaboren (darunter auch Sensorik und betriebliche Nachverfolgung des Tritiuminventars) sowie Aspekte des Tritumeinschlusses, Liefer- und Transportspezifika und eine mögliche Aufarbeitung vorgestellt. Mit dem Experiment KATRIN (Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment) wurde ein internationales Großprojekt vorgestellt, das die Energie der beim Tritiumzerfall entstehenden Elektronen präzise vermisst und das auf einen geschlossenen Tritiumkreislauf angewiesen ist.

Im Vortrag des BfS "Kernfusion – Schnittstellen mit dem Strahlenschutz & offene Forschungsfragen" wurde die Relevanz frühzeitig geplanter Strukturen und Konzepte zum Strahlenschutz in Kernfusionsanlagen erörtert. Darunter fällt auch die Weiterentwicklung radioökologischer Modelle für Tritium, die unter anderem bei der Bestimmung von

Grenzwerten für die Exposition der Bevölkerung eine entscheidende Rolle spielen. Auch die Emissionsüberwachung zukünftiger Fusionsanlagen (Tritium, aber auch Edelgase oder Neutronenaktivierungsprodukte), Notfallplanungen sowie die Entsorgung großer Abfallmengen beim Rückbau von Fusionsanlagen müssen vor dem Hintergrund eines umfassenden Strahlenschutzes mitgedacht werden.

Die Präsentation "Kernfusion aus Sicht einer Aufsichtsbehörde: Wendelstein 7-X" des Landesamts für Soziales und Gesundheit (LAGuS) Mecklenburg-Vorpommern gab einen umfassenden Überblick über wesentliche Schritte und Maßnahmen, sowie notwendige Verfahren und Vorkehrungen zur Erteilung der Betriebsgenehmigung. Darunter fallen etwa die Erfüllung der Errichtungsgenehmigungsaufgaben, die Erstellung von Sicherheitsberichten und die Prüfung von Sicherheit und Strahlenschutz anhand der Antragsunterlagen (Sicherheitsbewertung). Das Vorgehen wurde an Beispielen (u. a. Lüftungsanlagen, Plasmaheizung, Neutralteilcheninjektion) erläutert und die baulichen Gegebenheiten von Wendelstein 7-X vorgestellt. Darüber hinaus wurden Aspekte zur notwendigen Überwachung über die gesamte Betriebszeit und damit einhergehende Arbeiten erläutert.

Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik stellte in seinem Vortrag "Zukünftige Entwicklung Fusion" Konzepte zur Fusion und deren Spezifikationen vor. Vor dem Hintergrund aktueller Fragestellungen (Energieeinschlusszeiten, erreichbare Temperaturen und Dichten, Dimensionierungen, etc.) wurden Fortschritte und offenen Fragestellungen in den derzeitigen Stand der Forschung eingeordnet. Für verschiedene Systeme bzw. Aspekte der Fusionstechnologie (magnetischer Einschluss, Laserfusion) wurden "Technologiereifegrade" abgeschätzt und eine Roadmap zu zukünftigen Fusionskraftwerken skizziert.

Im Beitrag "Developing International Legal & Regulatory Frameworks for Fusion Energy, FELEX" der International Group of Legal Experts on Fusion Energy wurden mit Haftung, Sicherheitsstandards, Tritium-Governance, Abfallklassifizierung und Exportkontrolle Bereiche mit wesentlichen Lücken bei der Entwicklung internationaler regulatorischer Rahmenbedingungen aufgezeigt. Mit FELEX wurde eine Arbeitsgruppe von Rechtsexperten vorgestellt, die Orientierungshilfen zu rechtlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen im Bereich der Fusion erarbeitet. Anhand mehrerer Beispiele wurde gezeigt, dass in diesem und dem folgenden Jahrzehnt notwendige Weichen für die Lösung der genannten Problemfelder gestellt werden müssen.

Von Proxima Fusion wurden Konzepte aus Herstellersicht, insbesondere im Hinblick auf eine Regulierung der Fusion, vorgestellt. Vor den Schwerpunkten der Sicherheit, gesellschaftlichen Akzeptanz sowie juristischen und vergaberechtlichen Fragestellungen wurde die Fusion in Bezug zu anderen, etablierten Energiequellen eingeordnet und notwendige Schritte zu einem effizienten Regulierungsrahmen skizziert.

Im zweiten Beitrag des KIT wurde ein Überblick über den Brennstoffkreislauf und dessen Entwicklungsschritte gegeben sowie auf die Bestimmung des Tritiuminventars und dessen Bilanzierung eingegangen. Das Konzept der "Direkten Internen Rezyklierung" auf Grundlage einer Multi-Loop-Struktur wurde erläutert und die technischen Reifegrade der einzelnen Schritte bewertet. Darüber hinaus wurden Konzepte und der Stand der Entwicklung von weiteren essenziellen Komponenten (Vakuumpumpen, Brutblankets) fachlich eingeordnet.

Die Präsentation "Radioaktive Abfälle und Entsorgung aus der Kernfusion" des BASE gab einen allgemeinen Überblick über den internationalen Rahmen und nationale Zuständigkeiten bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Die Klassifikation von radioaktiven Abfällen in Deutschland (hoch-, sowie schwach- und mittelradioaktiv) wurde erläutert und Entsorgungspfade in Deutschland inklusive der möglichen Freigabe vorgestellt. Jene Aspekte sind auch im Kontext der Fusion relevant und erfordern eine frühe Vorausplanung für die Entsorgung möglicher radioaktiver Abfälle, zu deren Spezifikationen (Materialien, Chemotoxizität, Masse und Volumina) derzeit noch Forschungsbedarf besteht.

### 3 Regulatorik von Fusionsanlagen in Deutschland

Im Folgenden wird der Status der Regulierung von Fusionsanlagen in Deutschland dargestellt. Zunächst wird im Abschnitt 3.1 der Aufbau und die Systematik des deutschen Regelwerks analysiert. Anschließend werden im Abschnitt 3.2 Gesetze und Verordnungen untersucht, welche auf Fusionsanlagen Anwendung finden. Hierbei wird ein Fokus auf das Genehmigungsverfahren gelegt. Es folgt im Abschnitt 3.3 eine Erörterung untergesetzlicher Regeln, welche für Fusionsanlagen relevant sind. Anschließend wird im Abschnitt 3.4 am Beispiel von Wendelstein 7-X gezeigt, wie die bestehende Regulatorik auf Deutschlands modernste Fusionsanlage Anwendung findet. Das Kapitel 3 schließt im Abschnitt 3.5 mit einer Analyse der europarechtlichen und völkerrechtlichen Rahmenbedingungen ab, welche einen Einfluss auf das deutsche Recht haben.

#### 3.1 Aufbau des deutschen Regelwerks

Wesentlich für die Regulierung von Fusionsanlagen in Deutschland ist bisher schon das Strahlenschutzrecht. Dieses Rechtsgebiet ist durch eine Vielzahl untergesetzlicher sowie technischer Regelungen ausgestaltet.



**Abb. 3.1** Aufbau der deutschen Strahlenschutzregulierung

An der Spitze der Regelwerkspyramide steht das Grundgesetz (GG), welches Gesetzgebungs- und Verwaltungskompetenzen festlegt. Für die Fusion relevant ist, dass der Bund die ausschließliche Gesetzgebungskompetenz für die Regulierung der Fusion aufgrund des Kompetenztitels zur friedlichen Erzeugung der Kernenergie sowie des

Strahlenschutzes nach Art. 73 Abs. 1 Nr. 14 GG besitzt. Art. 87c GG bestimmt weiterhin, dass entsprechende Gesetze der Bundesauftragsverwaltung unterliegen können, wie es beim Strahlenschutzgesetz (StrlSchG) der Fall ist.

Auf der Ebene formeller Bundesgesetze sind das StrlSchG sowie durch Verweise und begrenzte Anwendbarkeit auch das Atomgesetz (AtG) relevant. Diese werden durch Rechtsverordnungen, insbesondere die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV), weiter konkretisiert.

Auf untergesetzlicher Ebene finden sich eine Vielzahl an allgemeinen Verwaltungsvorschriften, welche selbst keine Gesetzeskraft haben, allerdings für die Behörden verbindlich sind. Weitere Konkretisierungen finden sich in Bekanntmachungen des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) sowie in Richtlinien und Empfehlungen von Bundes- und Länderbehörden wieder. Zusätzliche untergesetzliche Konkretisierungen finden sich in Leitlinien, Regeln und Empfehlungen von Beratungsgremien wieder sowie in Standards, die sich die Industrie selbst auferlegt.

## **3.2 Gesetze und Verordnungen**

In diesem Abschnitt wird der bestehende nationale Rechtsrahmen für Fusionsanlagen analysiert. Hierbei liegt der Fokus auf Recht, welches die radiologischen und sicherheitsrelevanten Aspekte der Fusion betrifft.

Zentrales Gesetz für die Fusion ist das StrlSchG, welches den Regulierungsrahmen für sogenannte Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung sowie für den Umgang mit radioaktiven Stoffen außerhalb von Kernbrennstoffen aufspannt. Durch Verweise ist stellenweise auch das AtG relevant. Weitere wesentliche Regelungen sind in der auf Grundlage des Strahlenschutzgesetzes erlassenen Strahlenschutzverordnung enthalten.

### **3.2.1 Genehmigungen**

Als bauliche Anlagen benötigen Fusionsanlagen Baugenehmigungen entsprechend den jeweiligen Landesbauordnungen. Bei Entnahme von Kühlwasser wird außerdem eine wasserrechtliche Genehmigung notwendig sein. Fusionsanlagen bedürfen, soweit zurzeit ersichtlich, keiner eigenen Genehmigung nach Immissionsschutzrecht (§ 4 Abs. 1 BImSchG i. V. m. Anhang 1 4. BImSchV).

Da Fusionsanlagen keine Kernbrennstoffe im Sinne des § 2 Abs. 1 AtG verwenden, bedarf es keiner atomrechtlichen Genehmigungen. Allerdings erzeugen Fusionsanlagen Teilchenstrahlung mit mehr als 5 keV an Teilchenenergie, weswegen sie als Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung im Sinne des § 5 Abs. 2 StrlSchG zu klassifizieren sind. Da sowohl MCF- als auch ICF- Anlagen ein Plasma erzeugen, fallen sie unter die Anlagenkategorie der Plasmaanlage. Weiterhin wird in Fusionsanlagen mit sonstigen radioaktiven Stoffen im Sinne des § 3 Abs. 1 S. 1 StrlSchG umgegangen, hierunter fallen insbesondere Tritium, aber auch Radionuklide, die durch Neutronenaktivierung entstehen. Gegebenenfalls enthalten auch bestimmte Mess- und Kalibrierungsinstrumente sonstige radioaktive Stoffe. Das Attribut „sonstig“ bezieht sich darauf, dass es sich um radioaktive Stoffe handelt, welche keine Kernbrennstoffe sind.

Nach Strahlenschutzrecht benötigen Fusionsanlagen mehrere Genehmigungen. Zunächst bedarf es unter der in § 10 Abs. 1 Nr. 1 StrlSchG definierten Voraussetzung einer Errichtungsgenehmigung. Diese Voraussetzung umfasst, dass die Anlage in einer Sekunde mindestens  $10^{12}$  Neutronen produziert. Solch große Neutronenströme entstehen bereits heute in existierenden Anlagen mit MCF wie Wendelstein 7-X (W7-X), ASDEX Upgrade oder in ausländischen ICF-Anlagen wie NIF, sodass hiervon sowohl Anlagen, die magnetischen Einschluss als auch solche, die Inertialeinschluss betreiben, umfasst werden. Der Betrieb einer Fusionsanlage benötigt eine Betriebsgenehmigung nach § 12 Abs. 1 Nr. 1 StrlSchG. Der Umgang mit den sonstigen radioaktiven Stoffen bedarf einer Umgangsgenehmigung nach § 12 Abs. 1 Nr. 3 StrlSchG, wobei diese nach § 12 Abs. 3 StrlSchG auch von der Betriebsgenehmigung mitumfasst werden kann. Eine Stilllegungsgenehmigung für Fusionsanlagen am Ende ihrer Laufzeit ist nicht notwendig, der Umgang mit den sonstigen radioaktiven Materialien während Stilllegung und Rückbau muss aber von einer Umgangsgenehmigung nach § 12 Abs. 1 Nr. 3 StrlSchG abgedeckt sein.

### **3.2.2 Strahlenschutzrechtliche Genehmigungsvoraussetzungen**

Die Erteilung von Genehmigungen nach §§ 10 und 12 StrlSchG sind gebundene Entscheidungen. Das bedeutet, dass die zuständige Behörde keinen Ermessensspielraum in der Erteilung der Genehmigung besitzt. Liegen die Genehmigungsvoraussetzungen vor, so hat der Antragsteller einen einklagbaren Anspruch auf Erteilung der Genehmigung.

Die Genehmigungsvoraussetzungen für eine Errichtungsgenehmigung sind nach § 11 StrlSchG wie folgt:

- Zuverlässigkeit des Antragsstellers: Die persönliche Integrität muss der Verantwortung entsprechen, die mit der Einhaltung der Strahlenschutzvorschriften einhergeht. Ein Nachweis erfolgt regelmäßig durch ein polizeiliches Führungszeugnis /AKB 26 Rn. 26/.
- Bestellung eines (zuverlässigen und fachkundigen) Strahlenschutzbeauftragten: Es muss ein Strahlenschutzbeauftragter bestellt werden, der die Fachkunde besitzt, welche in der vom BMUKN herausgegebenen Fachkunde-Richtlinie Technik nach Strahlenschutzverordnung<sup>1</sup> vorgeschrieben ist. Für diese Person kann die Behörde eine Zuverlässigkeitsüberprüfung nach § 12b AtG und AtZüV verlangen.
- Gewährleistung, dass die Exposition von Personen die zugelassenen Grenzwerte in den allgemein zugänglichen Bereichen außerhalb des Betriebsgeländes nicht überschreitet: Diese betragen nach § 80 Abs. 1 StrlSchG als effektive Dosis 1 mSv im Kalenderjahr, inklusive einer maximalen effektiven Dosis von 0,3 mSv im Kalenderjahr für Einzelpersonen der Bevölkerung durch Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft oder Wasser nach § 99 StrlSchV.
- Details zur Ermittlung der Exposition finden sich in § 100 StrlSchV, in Ziffer 6.2 in den vom BMUKN herausgegebenen „Merkposten zu Antragsunterlagen in den Genehmigungsverfahren für Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlen nach § 11 Abs. 1 und 2 StrlSchV“ sowie in der AVV-Tätigkeiten. Für Ableitungen radioaktiver Stoffe gilt § 102 StrlSchV.
- Einhaltung der Umweltschutzvorschriften im Betrieb (§ 103 StrlSchV) und bei Störfällen (§§ 104 und 106-109 StrlSchV).
  - Betrieb: Über die Umsetzung der Anforderungen der §§ 99 bis 102 StrlSchV hinaus, ist die Emissions- und Immissionsüberwachung zu planen.
  - Stör- und Notfall: Sofern die Aktivität der offenen radioaktiven Stoffe das 10<sup>7</sup>-fache der Freigrenzen überschreitet, also z. B. bei Tritium 10<sup>16</sup> Bq (entspricht etwa 28 g), hat der Strahlenschutzverantwortliche nach §§ 104 Abs. 6 und 194 StrlSchV dafür zu sorgen, dass bei der Planung baulicher und sonstiger

---

<sup>1</sup> [https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund\\_18062004\\_RSII3150403.htm](https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_18062004_RSII3150403.htm)

Schutzmaßnahmen gegen Störfälle in der Umgebung der Anlage eine effektive Dosis von 50 mSv zugrunde gelegt wird (Störfallplanungswert). Zudem müssen vorbereitende Maßnahmen für Notfälle oder Störfälle getroffen werden. Die Planungen der Fusionsanlage müssen Maßnahmen enthalten, um den für den Katastrophenschutz und den für die öffentliche Sicherheit zuständigen Behörden die notwendigen Informationen und die erforderliche Beratung für deren Planungen zur Abwehr von Gefahren durch ionisierende Strahlung und der Begrenzung oder Beseitigung nachteiliger Auswirkungen eines Notfalls oder Störfalls zu geben (§ 106 StrlSchV). Weiterhin müssen notwendige Maßnahmen vorgesehen werden, die die Folgen des Notfalls oder Störfalls verringern (§ 107 StrlSchV). Außerdem müssen Notfälle, Störfälle oder sonstige bedeutsame Vorkommnisse der zuständigen Behörde unverzüglich gemeldet werden (§ 108 StrlSchV) sowie eine systematische Untersuchung von Vorkommnissen, Aufzeichnung und Aufbewahrung (§ 109 StrlSchV) durchgeführt werden. Ein Vorkommnis ist ein Ereignis in einer geplanten Expositionssituation, das zu einer unbeabsichtigten Exposition geführt hat, geführt haben könnte oder führen könnte (§ 1 Abs. 22 StrlSchV).

- Schutz gegen Störmaßnahmen und sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD): Unter diese Einwirkungen fallen terroristische Anschläge, Sabotageakte, Brandstiftung, Diebstahl, oder Explosionen, wobei hier ein Maßstab der praktischen Vernunft gilt, und ein Restrisiko hinzunehmen ist /AKB 26 Rn. 66/. Konkretisiert wird dies insbesondere durch die SEWD-Richtlinien und die DIN 25422:2026-04. Dies erfordert ein integriertes Sicherungs- und Schutzkonzept, welches einem *graded approach* folgt /AKB 26 Rn. 71 f./.
- Rechtfertigung der Strahlenexposition: Neue Tätigkeitsarten, mit denen eine Strahlenexposition verbunden ist, sind nach § 6 StrlSchG grundsätzlich rechtfertigungsbedürftig. Inwieweit ein formeller Nachweis für zukünftige Fusionskraftwerke notwendig sein wird, ist zu klären.

Die Genehmigungsvoraussetzungen für eine Betriebs- sowie Umgangsgenehmigung sind nach § 13 StrlSchG wie folgt:

- Zuverlässigkeit des Antragsstellers und der fachkundigen Strahlenschutzbeauftragten: Es gelten die gleichen Anforderungen wie für die Errichtungsgenehmigung.
- Ausreichende Zahl an fachkundigen Strahlenschutzbeauftragten.

- Notwendiges Wissen und Fertigkeiten der Mitarbeitenden im Hinblick auf die mögliche Strahlengefährdung und die anzuwendenden Schutzmaßnahmen.
- Ausreichende Zahl an notwendigem Personal für die sichere Ausführung der Tätigkeit.
- Nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Ausrüstung und Maßnahmen zum Einhalten von Schutzvorschriften sind vorhanden: Maßgeblich hierfür sind untergesetzliche Regelwerke wie Richtlinien, Rundschreiben und Empfehlungen des BMUKN und des BfS, die Einhaltung von DIN-Normen sowie die Erfahrungen aus anderen Anlagen.
- Rechtfertigung der Strahlenexposition: Es gelten die gleichen Anforderungen wie für die Errichtungsgenehmigung.
- Einhaltung sonstiger öffentlich-rechtlicher Vorschriften: Darunter fallen insbesondere Vorschriften des Baurechts, Wasserrechts und Immissionsschutzrechts.
- Vorsorge zur Erfüllung gesetzlicher Schadensersatzverpflichtungen: Entsprechend § 177 StrlSchG in Verbindung mit §§ 13-15 AtG und AtDeckV setzt die Behörde eine Deckungsvorsorge fest, die der Antragssteller zu treffen hat. Die Höhe ergibt sich aus der bei Erfüllung gesetzlicher Schadensersatzverpflichtungen potentiell ergebenden Haftung, welche diese nach den Umständen in gebotenem Ausmaß sicherstellt.
- SEWD-Maßnahmen: Es gelten die gleichen Anforderungen wie für die Errichtungsgenehmigung.
- Verfahren für Notfälle und geeignete Kommunikationsverbindungen: Es müssen Verfahren vorgesehen sein, die eine schnelle Einbeziehung und Kommunikation mit Sicherheitskräften sicherstellt.

Eine Genehmigung kann nach § 13 Abs. 5 StrlSchG auch zunächst für einen Probebetrieb erteilt werden.

### **3.2.3 Strahlenschutzrechtlich zuständige Behörden**

Die Umsetzung des Strahlenschutzrechts erfolgt in der Bundesauftragsverwaltung. Das bedeutet, dass die Länder das Recht im Auftrag des Bundes ausführen.

Dementsprechend sind zwar die Landesbehörden zuständig, allerdings unterliegen diese der Fach- und Rechtsaufsicht des Bundes, konkret des BMUKN.

Auf Landesebene sind die Länder frei darin, die Zuständigkeiten zu gestalten. Teilweise liegt die Zuständigkeit auf Ebene der zuständigen Gewerbeämter, teilweise auf Ebene von Landesbehörden und teilweise direkt im entsprechenden Umweltministerium. In Bayern ist beispielsweise das Landesamt für Umwelt für ASDEX Upgrade zuständig, in Mecklenburg-Vorpommern das Landesamt für Gesundheit und Soziales für Wendelstein 7-X, in Hessen das Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forst, Jagd und Heimat für den FusionsCampus Biblis und in Baden-Württemberg das Regierungspräsidium Karlsruhe für das Tritiumlabor Karlsruhe.

### **3.2.4 Stilllegung und Entsorgung**

Anders als für Anlagen, die nach AtG genehmigt sind, wird für Anlagen, die nach StrlSchG genehmigt sind, keine separate Genehmigung für Stilllegung und Abbau benötigt. Für kerntechnische Anlagen ist diese in § 7 Abs. 3 AtG festgelegt. Allerdings ist in den „Merkposten zu Antragsunterlagen in den Genehmigungsverfahren für Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlen nach § 11 Abs. 1 und 2 StrlSchV“ (nach StrlSchV von 2001) aufgelistet, was bei Beantragung einer Errichtungsgenehmigung im Hinblick auf eine spätere Stilllegung betrachtet werden muss:

„9. Stilllegung der Anlage oder von Anlagenteilen

Falls Aktivierung im Hinblick auf eine Stilllegung relevant:

9.1 Abschätzung der zu erwartenden Radioaktivität bei Stilllegung mit Angaben über große unzerlegbare radioaktive Komponenten

9.2 Vorschläge zur Weiterverwendung und zur Beseitigung der radioaktiven Teile, z. B.

Endlagerung

Zwischenlagerung und anschließende anderweitige Verwendung bzw. Beseitigung

Verwendung großer Komponenten

9.3 Beschreibung zur Prüfung der Voraussetzungen zur Freigabe nach § 29 StrlSchV“

Somit muss bereits vor Errichtungsbeginn ein Konzept vorliegen, wie mit der Anlage bzw. Anlagenteilen nach Stilllegung umgegangen wird.

Nach § 9a Abs. 1 AtG müssen radioaktive Reststoffe entweder schadlos verwertet oder als radioaktive Abfälle geordnet beseitigt werden. Dies gilt auch für Reststoffe aus Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung nach StrlSchG und somit für Fusionsanlagen. Dabei wird nicht zwischen schwach-, mittel- oder hochradioaktiven Abfällen unterschieden. In Deutschland sollen alle Arten von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen endgelagert werden /BMUKN 25/. In § 9a Abs. 2 und 3 AtG ist geregelt, dass und wohin radioaktive Abfälle abgegeben werden müssen.

Als schadlose Verwertung zählt zum Beispiel die spezifische oder uneingeschränkte Freigabe, für die je nach Verwertungsweg nuklidspezifische Grenzwerte festgelegt sind. Besteht die Möglichkeit einer Freigabe, so ist diese einer Entsorgung als radioaktiver Abfall vorzuziehen.

Im Nationalen Entsorgungsprogramm /BMUKN 25/ (NaPro, siehe Abschnitt 3.5.1) sind unter anderem Prognosen für in den nächsten Jahrzehnten erwartete radioaktive Abfälle enthalten. Diese beinhalten bislang keine Abschätzungen zu Abfällen aus möglichen zukünftigen Fusionsanlagen.

### **3.2.5 Sonstige rechtliche Aspekte**

Im Genehmigungsverfahren ist für Fusionsanlagen eine Umweltverträglichkeitsprüfung nach aktueller Rechtslage nicht erforderlich, auch keine Vorprüfung des Einzelfalls. Dies wäre nur dann der Fall, wenn eine Auflistung als Vorhaben in Anlage 1 des UVPG vorliegen würde. Eine Auflistung, unter welche eine Fusionsanlage subsumiert werden kann, existiert derzeit nicht.

Da es Stand heute nach UVPG keine Pflicht für Betreiber von Fusionsanlagen gibt, eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchzuführen, wird im weiteren Verlauf des ReFus Projekts untersucht, inwieweit ein Änderungsbedarf im UVP-Recht besteht – beispielsweise aufgrund europarechtlicher Vorgaben.

Sollten Fusionsanlagen im sogenannten baurechtlichen Außenbereich errichtet werden, gibt es bestimmte Einschränkungen. Die Errichtung baulicher Anlagen im Außenbereich ist grundsätzlich nicht möglich, es sei denn, es handelt sich um privilegierte Vorhaben oder ein besonders gelagerter Einzelfall bedarf einer Errichtung im Außenbereich.

§ 35 Abs. 1 Nr. 7 BauGB enthält eine Privilegierung für Anlagen, die der Erforschung, Entwicklung oder Nutzung der Kernenergie zu friedlichen Zwecken dienen. Ob die Fusionsenergie an dieser Stelle unter die Kernenergie subsumiert werden kann, ist fraglich. Dafür streitet die Tatsache, dass auch bei der Fusion die Energie aus Atomkernen gewonnen wird, dagegen streiten allerdings der historische Kontext, in welchem diese Privilegierung geschaffen wurde, sowie der Ausnahmecharakter der Bebauung im Außenbereich. Zu beachten ist allerdings, dass es der Gemeinde jederzeit freisteht, die baurechtliche Zulässigkeit mittels eines Bebauungsplans rechtssicher zu ermöglichen.

### **3.3 Untergesetzliches Regelwerk**

Das untergesetzliche Regelwerk (vgl. Abb. 3.1) umfasst eine Reihe von Regelungen und Bestimmungen, die für Fusionsanlagen zu berücksichtigen sind. Nachfolgend werden ausgewählte Beispiele genannt. Eine vollständige Übersicht von Verwaltungsvorschriften, Bekanntmachungen und weiteren relevanten Vorschriften und Empfehlungen befindet sich u. a. im „Handbuch Reaktorsicherheit und Strahlenschutz“, das vom BASE geführt und veröffentlicht wird /BASE 26/.

#### **3.3.1 Allgemeine Verwaltungsvorschriften**

Für den praktischen Strahlenschutz bei Fusionsanlagen ist die Allgemeine Verwaltungsvorschrift (AVV) zum Strahlenpass nach § 174 StrlSchV /AVV 22/ zu berücksichtigen. Diese richtet sich zwar an Behörden, regelt aber Voraussetzungen und Ablauf zur Führung eines Strahlenpasses für beruflich strahlenexponiertes Personal.

Für die Bestimmung der Strahlenexposition nach § 99 StrlSchV durch Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft und Wasser ist die AVV-Tätigkeiten /AVV 20/ heranzuziehen. Sie regelt detailliert die Annahmen und Berechnungsvorschriften zur Ermittlung der Strahlenexposition der repräsentativen Einzelperson der Bevölkerung infolge der Ableitung radioaktiver Stoffe und ist Voraussetzung für die Umsetzung der Anforderungen gemäß §§ 99 bis 102 StrlSchV.

#### **3.3.2 Bekanntmachungen des BMUKN**

Diese Kategorie umfasst eine Reihe von Richtlinien und weiteren Bekanntmachungen des BMUKN, die für die Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden verbindlich anzuwenden sind und somit im Genehmigungsverfahren zugrunde gelegt werden. Ein

wesentlicher Teil der Bekanntmachungen gilt für kerntechnische Anlagen und ist demzufolge für Fusionsanlagen nicht anzuwenden. Für Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung nach Strahlenschutzgesetz, zu denen Fusionsanlagen gehören, sind insbesondere Bekanntmachungen zu übergeordneten Strahlenschutzthemen relevant wie:

- Richtlinie „Ärztliche Überwachung exponierter Personen durch ermächtigte Ärzte nach Strahlenschutzrecht“ (RdSchr. des BMUV vom 3. August 2022 (GMBI. 2022, Nr. 33, S. 748)),
- Verschiedene Richtlinien zu erforderlichen Fachkunden,
- Merkposten zu Antragsunterlagen in den Genehmigungsverfahren für Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlen vom 12. November 2003 (GMBI. 2004, Nr. 1, S. 9), geändert durch RdSchr. des BMUB vom 22. September 2014 (GMBI. 2014, Nr. 68, S. 1411),
- Durchführung der Strahlenschutzverordnung und der Röntgenverordnung; Berichterstattung über besondere Vorkommnisse vom 30. März 2015 (GMBI. 2015, Nr. 16, S. 306),
- SEWD-Richtlinien zum Umgang mit sonstigen radioaktiven Stoffen und zur IT-Sicherheit,
- Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle zur Ermittlung der Körperdosen,
- Erläuterungen zu Meldekriterien sowie zur Berichterstattung über Meldungen nach § 108 StrlSchV.

Einige Bekanntmachungen sind für kerntechnische Anlage intendiert, lassen sich jedoch und werden in der Praxis sinngemäß auch für Anlagen und Umgang mit radioaktiven Stoffen nach Strahlenschutzgesetz herangezogen. Dies sind u. a.:

- Zum Nachweis der Umsetzung der Anforderungen des § 103 StrlSchV: Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen (REI) - (RdSchr. des BMUV vom 06.09.2023 S II 5 – 1563/002-2021.0001),
- Zum Nachweis der Begrenzung der Strahlenexposition nach § 104 StrlSchV: Fassung des Kapitels 4 „Berechnung der Strahlenexposition“ vom 29. Juni 1994 (BAnz. 1994, Nr. 222a), Neufassung des Kapitels 4 „Berechnung der Strahlenexposition“ gemäß § 49 StrlSchV vom 20. Juli 2001 verabschiedet auf der 186. Sitzung der

Strahlenschutzkommission am 11. September 2003, veröffentlicht in der Reihe „Berichte der Strahlenschutzkommission“, Heft 44, 2004 (ursprünglich Teil der „Leitlinien zur Beurteilung der Auslegung von Kernkraftwerken mit DWR“).

### **3.3.3 Leitlinien und Empfehlungen**

Hierbei handelt es sich überwiegend um Leitlinien und Empfehlungen der Reaktorsicherheitskommission (RSK), der Strahlenschutzkommission (SSK) und der Entsorgungskommission (ESK). Während die RSK sich im Kern mit sicherheitstechnischen Fragestellungen kerntechnischer Anlagen befasst, sind Fragestellungen des allgemeinen Strahlenschutzes im Fokus der SSK und Fragestellungen zu Stilllegung und Entsorgung im Fokus der ESK. Diese umfassen:

- Empfehlungen zum Katastrophenschutz und entsprechenden Maßnahmen,
- Empfehlungen zum Notfallschutz,
- Abgeleitete Richtwerte für Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung bei Ereignissen mit Freisetzungen von Radionukliden, Empfehlung der Strahlenschutzkommission, Verabschiedet in der 303. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 24./25. Oktober 2019.

Richtwerte dieser Empfehlung können zur Einschätzung der Auswirkungen von potentiellen Ereignisabläufen von Anlagen herangezogen werden.

Weitere Vorschriften umfassen beispielsweise die

- Feuerwehrdienstvorschrift FwDV 500 „Einheiten im ABC-Einsatz“, Stand 2022  
Diese Empfehlung ist relevant für die radiologische Einstufungen von Gebäuden und Räumen für die Brandbekämpfung und somit wesentlich für Fusionsanlagen.

### **3.3.4 Regeln des KTA**

Die Regeln des Kerntechnischen Ausschusses (KTA) sind für die Anwendung auf kerntechnische Anlagen vorgesehen und im atomrechtlichen Genehmigungsverfahren verbindlich bei Übernahme in das Genehmigungsverfahren. Da sie den Stand von Wissenschaft und Technik zumindest mitrepräsentieren, werden sie im atomrechtlichen Genehmigungsverfahren in der Regel auch angewendet. Bei Einhaltung der Regel ist sichergestellt, dass die erforderliche Sicherheit nach Stand von Wissenschaft und Technik erfüllt ist. Ein andersartiges Vorgehen ist zulässig, in diesem Fall ist jedoch vom

Antragsteller zu zeigen, dass damit ebenfalls die erforderliche Sicherheit erreicht wird. Diese Regeln sind nicht anzuwenden für Anlagen, die nach Strahlenschutzrecht genehmigt werden. Dennoch können sie inhaltlich geeignete Hilfestellung für die Umsetzung von sicherheits- und strahlenschutztechnischen Anforderungen auch für Fusionsanlagen bieten und dort sinngemäß und schutzzielorientiert zur Anwendung herangezogen werden. Dazu gehören zum Beispiel KTA-Regeln zu Anforderungen an die Dokumentation (12er Reihe) und an die Qualitätssicherung (14er Reihe), aber auch Regeln zur Überwachung der Ableitungen (15er Reihe) sowie die KTA 3604 zu Lagerung, Handhabung und innerbetrieblichem Transport radioaktiver Stoffe.

### **3.3.5 Industrienormen**

Für die Regulierung ist Normung von besonderer Bedeutung, da sie zur Konkretisierung technischer Sicherheitsanforderungen, zur Vereinheitlichung von Auslegungs-, Prüf- und Bewertungsmaßstäben sowie zur Schaffung nachvollziehbarer Grundlagen für Genehmigungs- und Aufsichtsentscheidungen beitragen kann. Den Normungsgremien kommt hierbei eine vermittelnde Funktion zwischen wissenschaftlich-technischer Entwicklung, industrieller Praxis und regulatorischer Ausgestaltung zu.

Zugleich ist zu berücksichtigen, dass Normen im Regelfall keine unmittelbare Rechtsverbindlichkeit entfalten. Ihre regulatorische Relevanz kann sich jedoch daraus ergeben, dass sie als fachlich anerkannte Maßstäbe in behördlichen und betrieblichen Entscheidungsprozessen herangezogen werden und auf diese Weise zur Konkretisierung des aktuellen Stands der Technik beitragen, der der Auslegung und Bewertung von Fusionsanlagen zugrunde gelegt wird. Vor diesem Hintergrund ist von besonderem Interesse, inwieweit bestehende Normen aus angrenzenden technischen und kerntechnischen Anwendungsfeldern auf Fusionsanlagen übertragbar sind und in welchen Bereichen aufgrund technologiespezifischer Besonderheiten die Entwicklung eigenständiger fusions-spezifischer Regelwerke erforderlich erscheint.

Ein zentraler Aspekt der Regulierung von Fusionsanlagen sind technische Regelwerke und Richtlinien nationaler und internationaler Normungsgremien, insbesondere des Deutschen Instituts für Normung (DIN), des *Comité Européen de Normalisation* (CEN) sowie der *International Organization for Standardization* (ISO). Diese sind für die Bewertung, ob Schutzmaßnahmen dem Stand der Technik entsprechen, von Relevanz. Dabei sind sowohl bestehende konventionelle und Strahlenschutz-Normen von Bedeutung als auch Normen, die gezielt für spezifische Anforderungen der Fusionstechnologie

entwickelt werden. Beispielhaft ist in diesem Zusammenhang die DIN EN ISO 16646:2026-06 zu nennen, welche Kriterien für die Auslegung und den Betrieb von Einschluss- und Lüftungssystemen in Tritiumfusionsanlagen sowie in Anlagen zur Handhabung von Fusionsbrennstoff festlegt.

Die Bearbeitung einschlägiger Themen erfolgt auf internationaler Ebene beispielsweise innerhalb der ISO in Gremien wie dem *Technical Committee 85*, dessen Tätigkeitsfeld die Nutzung der Kernenergie sowie Aspekte des Strahlenschutzes umfasst. Auf europäischer Ebene ist in diesem Zusammenhang insbesondere das *Technical Committee 430* zu nennen, das sich mit Normungsfragen im Bereich der Kernenergie und verwandter technischer Anwendungsfelder befasst. Innerhalb dieser organisatorischen Strukturen werden auch spezifische Fragestellungen der Fusionstechnologie behandelt. Auf nationaler Ebene besteht darüber hinaus im Rahmen des DIN entsprechende Arbeitsgremien wie die Arbeitsausschüsse NA 062-07-71 und -2, die sich mit normungsbezogenen und regulatorischen Fragestellungen im Kontext der Fusionstechnologie befassen.

Nachfolgend werden beispielhaft einige Normen genannt:

### **Konventionelle Normen**

Konventionelle Normen bilden in vielen Bereichen die Basis für die Auslegung von Anlagen auch unter Strahlenschutzrecht. Sie definieren teilweise Mindestanforderungen für solche Anlagen, gehen aber auch darüber hinaus. Beispielsweise werden Filter und Rückhaltesysteme für radioaktive Stoffe in der Luft auf Basis konventioneller Normen klassifiziert, geprüft und gefertigt (z. B. DIN EN 1822:2019-10). Umfassende Regelungen des IEC liegen etwa im Bereich der Prozessleittechnik und Funktionalen Sicherheit mit den Normen der Serien DIN EN 61508:2011-02 und DIN EN 61511:2019-02 vor. Auch im Bereich der Hebezeuge liegen umfassende Normen vor, die einen weiten sicherheitstechnisch anspruchsvollen Bereich abdecken (vgl. z. B. DIN EN 15011:2022-08 und DIN EN 13135:2018-08).

### **Allgemeine Strahlenschutznormen national und international**

Besonders hervorzuheben sind hierbei die DIN-Normen DIN 25422:2026-04 „Aufbewahrung und Lagerung sonstiger radioaktiver Stoffe–Anforderungen an Aufbewahrungseinrichtungen und deren Aufstellungsräume zum Strahlen-, Brand- und Diebstahlschutz“ und die der Serie 25425 „Radionuklidlaboratorien“, die der strahlenschutztechnischen

Auslegung von Fusionsanlagen zu Grunde gelegt werden können. Eine Reihe internationaler Normen des ISO und des IEC – überwiegend als DIN übernommen – legen Anforderungen an radiologische Messverfahren und Messgeräte, statistische Auswertungen, Dichtheit von Einschlüssen sowie für Lüftungsanlagen fest.

### **Fusionsspezifische Strahlenschutznormen**

Neben der bereits genannten DIN EN ISO 16646:2026-06 sind aktuell nur eine geringe Anzahl fusionsspezifischer Normen verfügbar. Diese betreffen u. a. Anforderungen an Supraleiter in der MCF (ISO 18518:2025-09) und Helium-Heißlecktests (ISO 4233:2023-03). Zahlreiche weitere Standards sind bei der ISO jedoch in der Entwicklung, wie zum Beispiel für Testmethoden elektrischer Isolierungen von Supraleitern bei niedrigen Temperaturen und für Einrichtungen zur Fernhantierung aktivierter Strukturen bei Wartung und Instandsetzung.

### **Normen der Kerntechnik, die ggf. sinngemäß anwendbar sein könnten**

Einige Normen sind explizit für kerntechnische Anlagen ausgewiesen. Dennoch können sie wertvolle Inhalte für die Umsetzung bewährter, sicherer Anwendungslösungen enthalten, die auch für Fusionsanlagen genutzt werden könnten. Dies betrifft z. B. die Überwachung von Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Luft (z. B. DIN ISO 2889:2024-04) und Lüftungsanlagen.

## **3.4      Praktische Anwendung des bestehenden Rechts: Beispiel Wendelstein 7-X**

Die auf dem Stellarator-Prinzip basierende Forschungsanlage Wendelstein 7-X (W7-X) in Greifswald dient der Erforschung der fusionsrelevanten Plasmaphysik und Weiterentwicklung von Anlagenkomponenten der Fusionsforschung. W7-X ist als Plasmaanlage mit Wasserstoff-, Helium- und Deuterium-Plasma genehmigt. Hierfür hat die im Land Mecklenburg-Vorpommern zuständige Behörde jeweils eine Errichtungs- und Betriebsgenehmigung unter dem Strahlenschutzrecht erteilt. Die Errichtungsgenehmigung wurde 1996 beantragt und 1997 erteilt; nach damaligem Stand basierend auf § 15 Abs. 1 StrlSchV 1977 i. d. F. 1989. Der Antrag auf Erteilung der Betriebsgenehmigung wurde 2014 gestellt und 2015 bewilligt; nach damaligem Stand basierend auf § 11 Abs 1 Nr. 1 StrlSchV 2001. Im Betrieb überwacht das zuständige Landesamt für

Soziales und Gesundheit (LAGuS) fortlaufend die Anlage und die Erfüllung der Pflichten des Betreibers an Wartung und Prüfung nach § 88 StrlSchV.

W7-X ist in seiner Gesamtheit als Plasmaanlage genehmigt, auch wenn einzelne Komponenten, insbesondere die Neutralteilchenheizung (NBI), selbst jeweils eine Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung im Sinne des § 5 Abs. 2 StrlSchG darstellen. Die Genehmigung zum Umgang mit sonstigen radioaktiven Stoffen, notwendig aufgrund des Entstehens von Tritium und Neutronenaktivierungsprodukten sowie durch den Umgang mit Kalibrierstrahlern, ist nach § 12 Abs. 3 StrlSchG von der Betriebsgenehmigung umfasst.

### **Errichtungsgenehmigung**

Die Errichtungsgenehmigung für W7-X wurde auf Grundlage eines Antrages gemäß § 11 Abs. 1 Satz 1 StrSchV 2001 erteilt. Der Antragsaufbau orientierte sich inhaltlich an den Merkposten zu Antragsunterlagen in den Genehmigungsverfahren für Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlen in der Fassung von 1978. Dementsprechend wurden

- Angaben über ökologische Verhältnisse am Standort, insbesondere zur Vorbelastung der Umgebung, zur Meteorologie und Hydrologie, zur Wasser- und Bodennutzung und zur Seismologie,
- Angaben zum Zweck der Anlage,
- Angaben zum Aufbau der Anlage, insbesondere zum grundlegenden Aufbau des Stellarators, zu den Heizsystemen, zu den Magnet- und Kühlsystemen, Anlagebauwerken,
- Angaben zum vorgesehenen Betrieb und zur Betriebsweise der Anlage, insbesondere vorgesehene Fusionsstoffe, Pulsdauern, angestrebte Teilchendichten und Plasmatemperatur,
- grundsätzliche Angaben zur Strahlenexposition und zum Strahlenschutz, insbesondere zur äußeren und inneren Strahlenexposition, zu Aktivierungen (Grundwasser- und Luftaktivierung) und radioaktiven Abfällen und zu strahlenschutzrelevanten Systemen (u. a. Abschirmungen),
- Angaben zu sicherheitsrelevanten Vorkehrungen und Sicherung mit Blick auf Brandschutzmaßnahmen und Sicherungsmaßnahmen,

- Grundlegende Sicherheitsbetrachtungen mit Betrachtung des größtmöglichen Störfalls sowie
- Angaben zur Stilllegung der Anlage oder von Anlageteilen

gemacht.

Für die Auslegungsbetrachtungen im Rahmen des Antrags auf Errichtung der Anlage wurde eine maximale Neutronenemissionsrate von  $6 \cdot 10^{15}$  n/s und eine maximale jährliche erzeugte Neutronenzahl von  $3 \cdot 10^{19}$  zugrunde gelegt und genehmigt.

Die Errichtungsgenehmigung umfasst neben organisatorischen Bestimmungen wie der Anzeige bei Wechsel des Strahlenschutzverantwortlichen oder des Strahlenschutzbeauftragten, der Meldepflicht bei bedeutsamen Vorkommnissen sowie dem Erbringen von Fachkundenachweisen des tätigen Personals auch technische Nebenbestimmungen zur Auslegung von Lagerräumen nach DIN 25422, zur Auslegung torusnaher Wasserkühlung als geschlossenem Kreislauf sowie zur begleitenden Erbringung von Nachweisen über die Materialzusammensetzung.

Der Antrag, insbesondere die Angaben im Sicherheitsbericht sowie Berechnungen zur Aktivierung und Abschirmung, wurde durch Sachverständige geprüft und entsprechende Gutachten erstellt. Die Prüfergebnisse wurden in der erteilten Errichtungsgenehmigung und deren Nachträgen berücksichtigt. Die Errichtung wurde begleitend geprüft.

### **Betriebsgenehmigung**

Der Antrag auf Betriebsgenehmigung für den Stellarator Wendelstein 7-X gemäß § 11 Abs. 2 StrSchV:2001 orientierte sich an den „Merkposten zu Antragsunterlagen in den Genehmigungsverfahren für Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlen nach § 11 Abs. 1 und 2 StrlSchV“ gemäß Rundschreiben RS II 3 – 17004/3 und damit an § 14 Abs. 4 i. V. m. Anlage II Teil B StrlSchV:2001. Als Antragsunterlagen wurden ein Sicherheitsbericht sowie zahlreiche Anlagen mit weiteren Angaben und Nachweisen übergeben. Der Antrag wurde im Auftrag der Genehmigungsbehörde von einem Sachverständigen hinsichtlich seiner Genehmigungsfähigkeit für einen sicheren Betrieb der Anlage geprüft. Im Zuge des Genehmigungsverfahrens wurden weitere Angaben und Nachweise übergeben. Die Prüfergebnisse wurden in einem Sicherheitsgutachten zusammengestellt und in der Betriebsgenehmigung berücksichtigt.

Die wesentlichen Elemente der durchgeführten Prüfungen betrafen:

- Aufbau und Betrieb der Anlage, u. a.
  - Gebäude, Systeme, Betriebsparameter, Anlagenaufbau, Betriebsweise,
  - Prüfung und Wartung, Aufzeichnungs- und Anzeigepflichten, Organisation,
  - Ausbildung des Betriebspersonals, Betriebsvorschriften,
  - Strahlenschutzanweisung,
- Innere und äußere Strahlenexposition, u. a.
  - Abschirmungs- und Aktivierungsberechnung,
  - Strahlenexposition in den Kontroll- und Überwachungsbereichen,
  - Ableitungsberechnungen,
  - Strahlenexposition außerhalb der Strahlenschutzbereiche,
  - Strahlenschutzsysteme zur Personensicherheit,
  - Zutrittskontrollen,
  - Überwachung Dosis, Dosisleistung,
  - Grundwasser- und Luftaktivierung,
- Sicherheitsbetrachtungen, u. a.
  - Versagen von Kontroll- und Überwachungseinrichtungen,
  - Identifizierung und Beherrschung von Gefahrenereignissen,
  - Quenchen der Magnetspulen,
  - Strukturschäden,
  - Brandschutz.

Im weiteren Verlauf wurden durch den Sachverständigen Prüfungen der technischen Umsetzung bei der Errichtung und Inbetriebnahme der Systeme und Ausrüstungen, der ordnungsgemäßen Anlagen- und Systemdokumentationen sowie der für den sicheren Betrieb der Anlage relevanten Prozeduren durchgeführt und die Ergebnisse in einem Abnahmeprüfbericht dokumentiert.

Genehmigt wurde der Betrieb der Anlage für Plasmen mit Wasserstoff (Protium), Helium und Deuterium und entsprechend der Errichtungsgenehmigung für eine maximale Neutronenemissionsrate von  $6 \cdot 10^{15}$  n/s und eine maximale jährlich erzeugte Neutronenzahl von  $3 \cdot 10^{19}$ . Ebenso wurden die Heizanlagen ECRH, ICRH und NBI von der Genehmigung umfasst. Die maximale Heizleistung einer Anlage wurde mit 20 MW (NBI für D-Betrieb) genehmigt. Die Ableitung radioaktiver Stoffe mit Wasser gemäß § 47 Abs. 4 StrlSchV:2001 wurde bis zum 10-fachen der Werte nach Anlage VII Teil D Tabelle IV Spalte 3 StrlSchV:2001, die zulässige Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft gemäß § 47 Abs. 3 StrlSchV:2001 wurde für Tritium mit  $2 \cdot 10^{11}$  Bq/a, für Edelgase mit  $2 \cdot 10^{10}$  Bq/a und für sonstige Radionuklide mit  $4 \cdot 10^7$  Bq/a genehmigt. Ebenso wurde der Umgang mit aktivierten und kontaminierten Anlagenteilen sowie der Umgang mit Neutronenquellen mit einer Gesamtaktivität von bis zum  $10^{10}$ -fachen der Freigrenze nach Anlage III, Tabelle 1, Spalte 2 StrlSchV:2001 genehmigt.

Mit der Betriebsgenehmigung wurden sicherheits- und strahlenschutztechnische Obergrenzen genehmigt, an die sich die Anlage schrittweise annähert. In der Anfangskonfiguration 2015 wurde ausschließlich mit Wasserstoff und ohne Kühlung des Plasmagefäßes sowie mit eingeschränkten Heizsystemen gearbeitet. Im Verlaufe des Ausbaus der Anlage wurden bzw. sind alle erforderlichen Systeme bis zum Deuteriumbetrieb mit maximaler Leistung vor Inbetriebnahme jeweils im Aufsichtsverfahren vorzustellen. Es ist jeweils nachzuweisen, dass der genehmigte sicherheits- und strahlenschutztechnische Rahmen eingehalten wird und die Anforderungen an Sicherheit und Strahlenschutz im Einzelnen erfüllt sind. Dies ist durch entsprechende Nebenbestimmungen der Genehmigung und Hinweise zu offenen Punkten in Abnahmeprüfberichten festgelegt.

### **3.5 Einfluss von europäischem und internationalem Recht auf Deutschland**

Im Folgenden werden die Anwendbarkeit entsprechender europäischer und völkerrechtlicher Regelungen sowie die Implikationen auf das deutsche Recht dargestellt. Dies umfasst insbesondere die Verträge und Rechtsakte sowohl der Europäischen Atomgemeinschaft (Euratom), der Europäischen Union sowie der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) und der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEA).

### 3.5.1 Euratom

#### Sicherheit

- Euratom-Vertrag: Enthält einheitliche Sicherheitsnormen nach Art. 2b) sowie Grundnormen für den Gesundheitsschutz der Bevölkerung und der Arbeitskräfte gegen die Gefahren ionisierender Strahlung nach Art. 30 ff. Der Vertrag enthält Grundlagen und Grenzen für den Erlass von Rechtsakten. Der Euratom-Vertrag erwähnt in seinem Anhang I die Fusion als Beispiel angewandter Physik auf dem Gebiet der Kernenergie, so dass die Fusion unter den breiten Anwendungsbereich des Vertrages fällt.
- Richtlinie 2009/71/Euratom und 2014/87/Euratom<sup>2</sup>: Enthalten Regelungen zur Gewährleistung eines hohen Sicherheitsniveaus kerntechnischer Anlagen in den Mitgliedsstaaten. Sie wurden durch das Atomgesetz und das untergesetzliche kerntechnische Regelwerk in nationales Recht umgesetzt /BMUKN 15/. Diese Richtlinien beschränken sich in ihrem Anwendungsbereich allerdings auf Kernspaltungsanlagen und erstrecken sich nicht auf Fusionsanlagen.
- Richtlinie 2011/70/Euratom<sup>3</sup>: Diese Richtlinie enthält Vorgaben zur Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle. Die Richtlinie beschränkt sich nicht auf radioaktive Abfälle aus Kernspaltungsanlagen, sondern umfasst sämtliche radioaktiven Abfälle, somit auch solche aus der Fusion. Dies wird im Atomgesetz in nationales Recht umgesetzt. Entsprechend ist Deutschland verpflichtet, einen nationalen Rahmen zu schaffen, der auch die Entsorgung von radioaktiven Abfällen aus der Fusion umfasst, sowie sicherzustellen, dass angemessene Finanzmittel für die Entsorgung bereitstehen. Die nationale Strategie für den Umgang mit radioaktiven Abfällen wird im Nationalen Entsorgungsprogramm /BMUKN 25/ (kurz NaPro) dargestellt und muss nach Art. 12 Abs. 3 der Richtlinie mindestens alle 10 Jahre aktualisiert werden.

---

<sup>2</sup> Richtlinie 2009/71/Euratom des Rates vom 25. Juni 2009 über einen Gemeinschaftsrahmen für die nukleare Sicherheit kerntechnischer Anlagen, zuletzt geändert durch die Richtlinie des Rates 2014/87/Euratom vom 8. Juli 2014

<sup>3</sup> RICHTLINIE 2011/70/EURATOM DES RATES vom 19. Juli 2011 über einen Gemeinschaftsrahmen für die verantwortungsvolle und sichere Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle

- Richtlinie 2013/59/Euratom<sup>4</sup>: Diese Richtlinie legt grundlegende Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung fest, konsolidiert und erweitert das Strahlenschutzsystem. Sie wird in Deutschland durch das StrlSchG und die StrlSchV umgesetzt. Diese Richtlinie umfasst allgemeine Grundsätze zum Strahlenschutzrecht, die ebenfalls die Fusion erfassen.

### **Nichtverbreitung**

- Euratom-Vertrag: Enthält in Art. 77 eigene Überprüfungsmaßnahmen (sog. *Safeguards*) und mandatiert die Anwendung von IAEA *Safeguards*. Fusionsanlagen fallen aktuell weder unter das IAEA *Safeguards* Regime (siehe Abschnitt 3.5.4), noch unter das Euratom *Safeguards* Regime.

## **3.5.2 Europäische Union**

### **Nichtverbreitung**

- Verordnung (EU) 2021/821<sup>5</sup>: Diese Verordnung verlangt von den Mitgliedstaaten, Exportkontrollen für gelistetes Material, Technologien und Ausrüstung anzuwenden, welche ebenfalls für die Fusion von Bedeutung sind. Darunter fallen beispielsweise Tritium (1C235), Systeme zur Tritiumrückgewinnung (1A225), Tritium-Anlagen (1B231), angereichertes Lithium (1B235 und 1C233), Deuterium (0C003), Anlagen zur Produktion und Gewinnung von Deuterium (0B004) sowie Technologie, welche in der Kerntechnik zur Erzeugung von elektrischem Strom eingesetzt wird und auch für die Fusion eingesetzt werden könnte (z. B. Dampferzeuger oder Wärmetauscher nach 0A001).

---

<sup>4</sup> Richtlinie 2013/59/Euratom des Rates vom 5. Dezember 2013 zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung und zur Aufhebung der Richtlinien 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom und 2003/122/Euratom

<sup>5</sup> Verordnung (EU) 2021/821 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Mai 2021 über eine Unionsregelung für die Kontrolle der Ausfuhr, der Vermittlung, der technischen Unterstützung der Durchfuhr und der Verbringung betreffend Güter mit doppeltem Verwendungszweck

## **Sonstige rechtliche Aspekte**

- Richtlinie 2011/92/EU<sup>6</sup> (UVP-Richtlinie): Diese Richtlinie regelt die Pflicht der Mitgliedsstaaten, für bestimmte Projekte, bei denen mit erheblichen Umweltauswirkungen zu rechnen ist, eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchzuführen. Diese Richtlinie ist im UVPG umgesetzt.

### **3.5.3 OECD/NEA**

#### **Haftung**

- Pariser Übereinkommen über die Haftung gegenüber Dritten auf dem Gebiet der Kernenergie (1960, erweitert 2004): Das Pariser Atomhaftungsübereinkommen normiert die Haftungsgrundsätze und den Umfang der Haftung für nukleare Schäden. Umgesetzt ist dies in den §§ 25-40c AtG sowie in der Verordnung über die Deckungsvorsorge nach dem Atomgesetz (AtDeckV). Die Definition des nuklearen Schadens nach Art. 1(a)(vi) begrenzt sich auf solche Schäden, die im Zusammenhang mit einer Kernanlage entstanden sind. Die Definition der Kernanlage nach Art. 1(a)(ii) umfasst aktuell keine Fusionsanlagen, /OECD 20/. Laut /OECD 20/ könne die Definition vom Direktionsausschuss für Kernenergie der OECD/NEA auf solche Anlagen erweitert werden. Entsprechende Diskussionen finden in einer Working Group statt, wobei sich bisher noch kein Konsens bilden konnte. Ob dem Direktionsausschuss laut Pariser Atomhaftungsübereinkommen tatsächlich eine solche Rechtsmacht zusteht, ist umstritten. Somit besteht mangels der Erfassung von Fusion für Deutschland aktuell keine völkerrechtliche Verpflichtung zu Haftungsfragen für Fusionsanlagen.
- Zusatzübereinkommen vom 31. Januar 1963 zum Pariser Übereinkommen in der Fassung des Zusatzprotokolls vom 28. Januar 1964 und des Protokolls vom 16. November 1982 (überarbeitet 2004): Das sogenannte Brüsseler Zusatzabkommen erhöht die Summen, welche nach dem Pariser Atomhaftungsübereinkommen bereitzustellen sind. Die Anwendbarkeit des Brüsseler Zusatzübereinkommens scheitert bereits an der Nichtanwendbarkeit des Pariser Atomhaftungsübereinkommens, s. o.

---

<sup>6</sup> RICHTLINIE 2011/92/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 13. Dezember 2011 über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten

### 3.5.4 IAEA

#### Sicherheit

- Übereinkommen über nukleare Sicherheit (1994), umgesetzt in BGBl. II 1997, Nr. 2 vom 15.1.1997, S. 130: Das Übereinkommen verpflichtet Deutschland, Standards und Vorkehrungen der nuklearen Sicherheit in Deutschland umzusetzen, um ein möglichst hohes Niveau an nuklearer Sicherheit von Kernanlagen zu gewährleisten. Die Definition der Kernanlage in Art. 2(i) beschränkt sich auf Anlagen, in welchen sich radioaktives Material, insbesondere nukleare Brennelemente, befinden. Aus der Historie, dem Kontext und dem Text des Übereinkommens (z. B. Abschnitt "Allgemeine Sicherheitsüberlegungen"), ergibt sich, dass der Fokus allein auf Kernspaltungsanlagen liegt. Das Übereinkommen ist daher nicht ohne Weiteres auf die Fusion anwendbar.
- Übereinkommen über die Sicherheit abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle (1997), umgesetzt in BGBl. II 1998, Nr. 21 vom 20.8.1998, S. 1752: Das Übereinkommen verpflichtet Deutschland, Regelungen zur Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle einzuhalten. Fusionskraftwerke werden zwar keine Brennelemente verwenden, voraussichtlich aber radioaktiven Abfall produzieren. Solcher ist definiert als sämtliches radioaktives flüssiges, festes oder gasförmiges Material, für welches keine weitere Verwendung vorgesehen ist. Entsprechend ist Deutschland völkerrechtlich verpflichtet, Sicherheitsstandards für die Handhabung und Lagerung radioaktiver Fusionsabfälle anzuwenden. Diese Verpflichtung erfüllt Deutschland durch die Umsetzung im AtG und AtEV.
- Übereinkommen über Hilfeleistung bei nuklearen Unfällen oder radiologischen Notfällen (1986), umgesetzt in BGBl. II 1989, S. 434: Diese Konvention verpflichtet Deutschland, im Falle von nuklearen und radiologischen Unfällen in anderen Staaten Hilfe zu leisten, wenn ein Hilfersuchen an die Bundesrepublik Deutschland gerichtet wurde und sie in der Lage ist, die erbetene Hilfe zu leisten. Mangels eingrenzender Definitionen ist dieses Übereinkommen auch auf Unfälle in Fusionsanlagen anwendbar. Eine entsprechende Hilfeleistungspflicht Deutschlands bestünde somit im Falle eines solchen Unfalls, genauso könnte Deutschland Hilfeleistungen bei anderen Staaten oder der IAEA ersuchen.
- Übereinkommen über die frühzeitige Benachrichtigung bei nuklearen Unfällen (1968), umgesetzt in BGBl. II 1989, S. 434: Dieses Übereinkommen verpflichtet

Deutschland im Falle nuklearer Unfälle, betroffene Staaten sowie die IAEA über den Zeitpunkt, den Ort und die Natur des Unfalls zu informieren. Da das Übereinkommen die Formulierung „any nuclear reactor“ verwendet, ist eine Anwendung auf Fusionsreaktoren ebenfalls geboten (/TON 23/). Zu beachten ist aber, dass die völkerrechtliche Notifikationspflicht nur dann besteht, wenn es wahrscheinlich erscheint, dass es zu grenzüberschreitenden radiologischen Folgen kommt.

## **Sicherung**

- Übereinkommen über den physischen Schutz von Kernmaterial (1979), umgesetzt in BGBl. II 1990, S. 326: Dieses Übereinkommen verpflichtet die Vertragsstaaten zur Implementierung von Maßnahmen zur Sicherung von Kernmaterial. Da sich die Definition des Kernmaterials in der Konvention allerdings auf Plutonium und Uran beschränkt, ist diese Konvention nicht auf Fusionsanlagen anwendbar.

## **Nichtverbreitung**

- Nichtverbreitungsvertrag (NPT) (1968), umgesetzt in BGBl. II 1974, Nr. 32 vom 8.6.1974, S. 785: Der NPT verpflichtet Deutschland dazu, keine Kernwaffen zu entwickeln, wobei sich das Verbot auch implizit darauf erstreckt, Knowhow für eine entsprechende Waffe zu verwenden (Art. II). Die Einhaltung des Verbots wird kontrolliert durch IAEA *Safeguards* sowie die Anwendung von Exportkontrollen (Art. III). *Safeguards* und Exportkontrollen nach dem NPT beschränken sich aber auf spaltbares Material und Spaltungsanlagen /SAU 26/.
- Comprehensive Safeguards Agreement INFCIRC/193 (1973), umgesetzt in BGBl. II, 1997, Nr. 32, S. 794: Legt den Umfang der Rechte der IAEA zur Implementierung von *Safeguards* fest. Deutschland erlaubt unter diesem Abkommen der IAEA allerdings nur die Überprüfung von spaltbarem Material und den Zugang zu Anlagen des Brennstoffkreislaufes für kerntechnische Anlagen.
- Additional Protocol INFCIRC/540 (2004), umgesetzt in BGBl. II, 2004, S. 789: Erweitert den Umfang der Rechte der IAEA zur Implementierung von *Safeguards*. Nach dem Additional Protocol kann die IAEA unter anderem Umweltproben sammeln und hierfür einen zusätzlichen Zugang verlangen. Dies könnte der IAEA die Möglichkeit eröffnen, in der Umgebung von Fusionskraftwerken und -anlagen sicherzustellen, dass diese nicht zur Plutoniumproduktion verwendet werden.

### 3.5.5 Sonstige internationale Organisationen und Institutionen

#### Nichtverbreitung

Nuclear Suppliers Group (NSG) und Zangger Committee Guidelines: NSG und Zangger Komitee beruhen auf einem freiwilligen Zusammenschluss von Staaten. Ihre Regelungen und Richtlinien sind völkerrechtlich nicht bindend, sondern basieren auf freiwilliger Kooperation und dem gemeinsamen politischen Willen der Mitgliedstaaten, die Verbreitung von Kernwaffen zu verhindern. Deutschland ist Mitglied der NSG und des Zangger Komitees und berücksichtigt die Richtlinien zur Exportkontrolle von Technologien und Materialien der Kerntechnik. Demnach genehmigt das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) Exporte an Nichtatomwaffenstaaten nur dann, wenn der Kernbrennstoffkreislauf Gegenstand von *Safeguards* ist und es zudem kein inakzeptables Risiko zur Verbreitung von Atomwaffen oder zur Förderung von nuklearem Terrorismus besteht. Die NSG Dual-Use Liste ist zudem Bestandteil einer EU-Richtlinie (siehe hierzu Abschnitt 3.5.2). Weiterhin unterhalten sowohl die NSG als auch das Zangger Komitee sogenannte Trigger-Listen, die das Exportkontrollverfahren verschärfen. Deutschland muss hierbei grundsätzlich zurückhaltend handeln, die Anwendung von IAEA *Safeguards* verlangen und Zusicherungen erhalten, dass die Materialien oder die Gerätschaften nicht für Atomwaffen verwendet werden und dass weitere Exporte ebenfalls nur bei bestehenden *Safeguards Agreements* erfolgen dürfen. Die Zangger Trigger-Liste schließt Fusionsreaktoren explizit von der Exportkontrolle aus, beide Trigger-Listen enthalten aber fusionsrelevante Technologien und Materialien in Bezug auf Deuterium- und Tritiumtechnologie.

#### Sicherung

Völkerrechtlich relevantestes Instrument im Rahmen der nuklearen Sicherung außerhalb der IAEA ist das Internationale Übereinkommen zur Bekämpfung nuklearer terroristischer Handlungen (2005), umgesetzt in BGBl. II, 2007, Nr. 33, S. 1586: Die Konvention verpflichtet Deutschland zu Maßnahmen der nuklearen Sicherung, um zu verhindern, dass nichtstaatliche Akteure Zugriff auf nukleare und radioaktive Materialien erhalten. Sie stellt insbesondere eine Reihe von Handlungen, die mit radioaktivem Material oder Kernwaffen in Verbindung stehen, unter Strafe und verpflichtet die Vertragsstaaten, bei der Verfolgung und Bestrafung von Tätern zusammenzuarbeiten. Hierbei ist die Definition weit genug, um auch fusionsrelevantes Material wie Tritium oder dessen Abfälle abzudecken. Diese Verpflichtung erfüllt Deutschland durch die §§ 307, 309-312, 328 StGB.

## **Beteiligung der Öffentlichkeit und der Nachbarstaaten**

Die Aarhus- und Espoo-Konventionen, verabschiedet im Rahmen der Vereinten Nationen, enthalten Verfahrensvorschriften für bestimmte Vorhaben, die negative Umweltauswirkungen befürchten lassen. Die Espoo-Konvention erfordert in diesen Fällen eine Prüfung der Umweltauswirkungen auf Nachbarstaaten sowie eine Notifikation an diese. Die Aarhus Konvention verpflichtet zur Beteiligung der Öffentlichkeit in besonderen Vorhaben, die erheblichen Einfluss auf die Umwelt haben können.

In Deutschland wurden die Espoo und Aarhus Konventionen im Rahmen des UVPG in nationales Recht umgesetzt (vergleiche Abschnitt 3.2.5).

Ob Deutschland aufgrund dieser Konventionen völkerrechtlich dazu verpflichtet ist, Fusionsanlagen in das UVPG aufzunehmen, ist Gegenstand künftiger Betrachtungen.



## 4 Übersicht über die Fusionsregulierung in ausgewählten Ländern

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den Stand der Fusionsregulierung in verschiedenen Ländern. Die Länder wurden dabei in Bezug auf ihre bestehende Fusionsinfrastruktur sowie auf bestehende Fusionsregulierungsprojekte ausgewählt. Betrachtet werden die USA, Frankreich, das Vereinigte Königreich und Japan. Die USA werden betrachtet, da es sich um das erste Land handelt, welches konkrete legislative Schritte zur Fusionsregulierung unternommen hat. Weiterhin befinden sich die meisten Startups und das meiste investierte private Kapital in den USA [IAEA 25]. Die Rechtslage in Frankreich ist aufgrund der erfolgten Genehmigung von ITER interessant. Die Rechtslage im Vereinigten Königreich ist wegen der Genehmigung von JET sowie den legislativen Schritten in Hinblick auf STEP und Fusions-Startups relevant. Zuletzt wird Japan betrachtet, wo sich der aktuell größte Tokamak mit dem JT-60SA befindet.

### 4.1 USA

Die im Atom- und Strahlenschutzrecht wichtigste Rechtsquelle der USA ist der *Atomic Energy Act*. Dieses Gesetz reguliert sowohl Kernkraftwerke als auch Aspekte des allgemeinen Strahlenschutzrechts. Es enthält wesentliche Definitionen, auf die auch andere Rechtsquellen des US-amerikanischen Atom- und Strahlenschutzrechts verweisen. So ist *atomic energy* definiert als alle Formen an Energie, die im Prozess der Kernspaltung oder Kerntransformation frei wird (Section 11c), somit auch Fusionsenergie. Weiterhin unterscheidet das Gesetz zwischen *special nuclear material* und *byproduct material*. *Special nuclear material* ist im Wesentlichen definiert als Plutonium und angereichertes Uran (Section 11z). Historisch war *byproduct material* solches Material, welches als Nebenprodukt des Spaltungskreislaufs oder an Teilchenbeschleunigern angefallen ist. Mittels des *ADVANCE Acts* wurde der *Atomic Energy Act* im Jahr 2024 dahingehend erweitert, dass nun auch eine *fusion machine* ein Teilchenbeschleuniger ist (Section 11e(3)(B)(i)), welcher *byproduct material* produziert. Eine *fusion machine* ist eine Maschine, welche Atomkerne durch Fusionsprozesse in andere Elemente, Isotope oder Teilchen transformiert und dabei unmittelbar die resultierenden Produkte, darunter Teilchen, Wärme oder sonstige elektromagnetische Strahlung, einfängt und verwendet.

Folglich wird Fusionsmaterial in den USA nun als *byproduct material* reguliert. Dadurch, dass Fusionsanlagen wie auch Teilchenbeschleuniger unter der *Byproduct Material*

*Regulation* behandelt werden, haben die USA eine legislative Entscheidung getroffen, die Fusionsregulierung von der Regulierung der Kernspaltungsanlagen zu trennen.

*Byproduct material* nach Section 11e(3)(B)(i), also auch solches produziert in Fusionsanlagen, ist näher reguliert durch eine Verordnung der *Nuclear Regulatory Commission* (NRC), insbesondere in 10 CFR Part 30. Diese Verordnung orientiert sich an allgemeinen Regelungen zum Strahlenschutz.

Um die Fusion auch im technischen Regelwerk abzudecken, hat die NRC im Februar 2026 verschiedene Änderungen vorgeschlagen. Der Vorschlag umfasst, dass im Wesentlichen das Strahlenschutzrecht weiter angewendet werden soll. Kleinere Anpassungen soll es in Bezug auf die Materialbilanzierung sowie die Regeln für Inspektionen geben. Die Regeln umfassen zudem, dass der Betreiber die Finanzierung des Rückbaus sicherstellen und einen Notfallplan entwickeln muss, sofern eine Dosis für eine Person der Öffentlichkeit von mehr als 10 mSv als Folge von Störfällen erreicht werden kann. Weiterhin sind allgemeine Strahlenschutzgrundsätze anwendbar, ein Umweltbericht vorzulegen, das Exportkontrollregime für Tritium und Li-6 zu beachten sowie Sicherungsmaßnahmen umzusetzen.

Die technische Regulierung wird weiter spezifiziert in NUREG-Leitlinien, die von der NRC herausgegeben und laufend aktualisiert werden. Für die Fusion spezifisch wurde ebenfalls im Februar 2026 von der NRC ein Vorschlag veröffentlicht, welcher Leitlinien für die Antragssteller umfasst. Dieses Dokument hat die Bezeichnung NUREG-1556, Volume 22. Nach diesem Entwurf soll *byproduct material* aus *fusion machines* zukünftig in *low-level waste disposal sites* entsorgt werden können, wenn sie die Annahmekriterien dafür erfüllen. Dafür sind für verschiedene Radionuklide spezifische Aktivitäten vorgegeben, die radioaktive Abfälle erfüllen müssen, um so entsorgt werden zu können. *Low-level waste* wird in oberflächennahen Endlagern entsorgt. Eine Zwischenlagerung (*interim or long term storage*) wird in diesem Entwurf von der NRC als keine Alternative zur Endlagerung des schwachradioaktiven Abfalls angesehen.

## **4.2            Vereinigtes Königreich**

Nukleare Anlagen sind im Vereinigten Königreich (UK) durch den *Nuclear Installations Act* reguliert und fallen unter die Zuständigkeit des *Office for Nuclear Regulation* (ONR). Im *Energy Security Bill* wurde im Jahr 2023 spezifiziert, dass *fusion energy facilities* nicht

als *nuclear site* einzuordnen sind (Section 1(2A)). Eine *fusion energy facility* ist definiert als ein Standort (*site*), der für die Errichtung oder den Betrieb einer Anlage genutzt wird, die für die Erzeugung von elektrischer Energie oder Wärme durch Fusion ausgelegt oder angepasst ist und nicht auch für die Errichtung oder den Betrieb eines Kernreaktors genutzt wird.

Entsprechend sind Fusionsanlagen im UK aktuell nach Strahlen- und Umweltschutzrecht reguliert, genauer in *Environmental Permitting Regulations* (EPR) und *Ionising Radiations Regulations* (IRR). Zuständig ist die *Environment Agency* sowie die *Health and Safety Executive*. Zu beachten gilt hier, dass die EPR nur auf England und Wales anwendbar sind. Das UK hat angekündigt, den weiteren Entwicklungsprozess von Fusionsanlagen zu beobachten und dabei gegebenenfalls zu untersuchen, ob es Anpassungsbedarf dieser Regulatorik gibt. Um Planungssicherheit zu gewährleisten, erfolgt dies aber nur etwa alle zehn Jahre /BEIS 21/.

Obwohl (radioaktiver) Abfall möglichst vermieden bzw. Reststoffe wiederverwendet werden sollen, wird auch im UK davon ausgegangen, dass durch Fusionsreaktoren radioaktiver Abfall entstehen wird, der entsorgt werden muss /CoRWM 21/. Schwachradioaktiver Abfall (maximal 4 GBq/Tonne an Alpha-Aktivität oder 12 GBq/Tonne an Beta-/Gamma-Aktivität) kann im UK in einem oberflächennahen Endlager entsorgt werden. Mittel- und hochradioaktive Abfälle unterscheiden sich in der UK-Klassifikation nicht anhand ihrer spezifischen Aktivitäten, sondern nur aufgrund ihrer Wärmeentwicklung. Allerdings wird in /CoRWM 21/ darauf hingewiesen, dass es aufgrund der Mobilität und langen Halbwertszeit einiger erwarteter Radionuklide schwierig werden könnte, radioaktiven Abfall aus Fusionsanlagen oberflächennah endzulagern.

Die Lizenzierung und Regulierung von JET ist von besonderem Interesse, da es das einzige zivile europäische Fusionsexperiment war, welches bereits Tritium verwendet hat. JET wurde von der UKAEA in Culham betrieben. Der Standort von JET ist nicht als Nuklearstandort nach britischem Atomrecht lizenziert. Allerdings wurden für JET freiwillig *safety cases* (Sicherheitsnachweise) nach Vorbild der ONR-Guidelines erstellt, die sowohl nukleare als auch nicht-nukleare Gefahren berücksichtigen. Diese *safety cases* berücksichtigen insbesondere Strahlung ausgehend vom Torus, sowohl während des Schussbetriebs als auch danach, Tritium und tritiiertes Wasser als Strahlungsquelle, Hochspannung, explosive Gase und entflammbares Material, giftige Substanzen wie Beryllium und Gase, die zur Erstickung führen können, rotierende Maschinen und Hochdrucksysteme, Temperaturextreme sowie kryogene Flüssigkeiten /BEL 99/, /JOH 24/,

/BOY 16/. Diese *safety cases* sollen demonstrieren, dass das ALARP-Prinzip (as low as reasonably practicable) eingehalten wird.

### 4.3 Frankreich

Während das deutsche Recht mit StrlSchG und AtG zwei Gesetze für unterschiedliche Arten des Umgangs mit radioaktiven Stoffen (Kernbrennstoffe – AtG, sonstige radioaktive Stoffe – StrlSchG) und der Art der Anlage (kerntechnische Anlage – AtG, Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung – StrlSchG) kennt, reguliert das französische Recht sämtliche Aspekte des Atom- und Strahlenschutzrechts im französischen Umweltgesetzbuch *code de l'environnement* sowie nachgelagerten Verordnungen und Dekreten.

Innerhalb des französischen Umweltrechts gibt es eine Unterscheidung der Anlagen je nach Menge der radioaktiven Stoffe. Ob es sich dabei um Kernbrennstoffe oder sonstige radioaktive Stoffe handelt, ist für das französische Recht nachrangig. Anlagen, die mit geringen Mengen an radioaktivem Material umgehen, fallen unter eine *installation classée pour la protection de l'environnement* (kurz: ICPE), während der Umgang mit größeren Mengen zur Klassifizierung als nukleare Anlage oder *installation nucléaire de base* (kurz: INB) nach articles R-593-1 ff. *code de l'environnement* führt. Für Tritium liegt die Schwelle beispielsweise bei etwa 28 g. Eine Fusionsanlage, wie ITER, die einen Umgang mit mehr als diesem Wert genehmigt bekommen möchte, fällt unter die Kategorie der INB. Unter die Kategorie der INB fallen nach article L593-2 *code de l'environnement* verschiedenste Typen an Anlagen: Kernreaktoren; mehrere Anlagentypen, die mit Kernbrennstoffen umgehen; Anlagen, die mit radioaktivem Material ab bestimmten Grenzwerten umgehen; Teilchenbeschleuniger und tiefengeologische Endlager für radioaktiven Abfall.

Das bedeutet, dass nach französischem Recht Fusionsanlagen unter die gleiche rechtliche Kategorie fallen wie Kernkraftwerke. Eine Unterscheidung findet dann erst auf Ebene des technischen Regelwerks statt.

**Tab. 4.1** Vergleich des deutschen und französischen Strahlenschutz- und Atomrechts

|                                      | Frankreich                                                                                                                                                                        | Deutschland                                                                                                                                         |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Anlagentypen                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>– ICPE</li> <li>– INB</li> </ul>                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung</li> <li>– Kerntechnische Anlage</li> </ul>                   |
| Differenzierungskriterium            | Inventarmengen                                                                                                                                                                    | Spaltbares Material vs. sonstige radioaktive Stoffe                                                                                                 |
| Relevante Gesetze                    | Code de l'environnement                                                                                                                                                           | StrlSchG / AtG                                                                                                                                      |
| Relevante Schwellenwerte für Tritium | <ul style="list-style-type: none"> <li>– 2,8 µg (ICPE Kenntnisgabeverfahren)</li> <li>– 28 mg (ICPE Genehmigungsverfahren)</li> <li>– 28 g (INB Genehmigungsverfahren)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– 2,8 µg (Freigrenze nach StrlSchV)</li> <li>– 28 g (Störfallvorsorge und -planung nach StrlSchV)</li> </ul> |

Entsprechend Art. 14 des ITER *Agreements* ist Frankreich als Gaststaat für die Lizenzierung von ITER zuständig. Die zuständige Behörde ist die *Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection* (ASNR). Zu unterscheiden ist hierbei zwischen dem Forschungsreaktor ITER selbst und der ITER IO, der internationalen Organisation, welche ITER betreibt.

Die Errichtungslizenz wurde am 9. November 2012 per Dekret n° 2012-1248 (/FRA 12/) erteilt. In diesem Dekret wird ITER erlaubt, mit bis zu 4 kg an Tritium umzugehen, wobei davon bis zu 1 kg im Vakuumgefäß sein dürfen (art. 2-I). Das Dekret begrenzt ebenfalls die Leistung auf 700 MW. In der Lizenz sind außerdem zwei Schutzziele definiert (Art. 2-III): Sicherer Einschluss des radioaktiven Materials und Begrenzung der Strahlenexposition. Diese müssen mit Hilfe geeigneter Sicherheitsfunktionen eingehalten werden.

Außerdem sind im Dekret Vorgaben zu Abfällen enthalten, wobei die Abfallmengen möglichst geringgehalten und Entsorgungswege insbesondere für mit Tritium kontaminiertes Material, Beryllium, Wolfram oder Molybdän vor Anfall der Abfälle festgelegt werden müssen (Art. 2-V-5). Dabei wird davon ausgegangen, dass neben tritiumhaltigen Abfällen auch mittelradioaktive Abfälle mit langen Halbwertszeiten anfallen (MA-VL). In der französischen Klassifikation radioaktiver Abfälle entspricht dies spezifischen Aktivitäten von  $10^6$  bis  $10^9$  Bq/g mit Halbwertszeiten von mehr als 31 Jahren. MA-VL soll in Frankreich tiefergeologisch endgelagert werden. Zuletzt ist die ITER IO verpflichtet, die

Dosisgrenzwerte für die Bevölkerung zu überwachen und die ASNR über die Werte zu informieren (Art. 2-V-5).

Zu beachten ist außerdem, dass sich die Betriebsgenehmigung bislang nur auf den D-D Betrieb beschränkt. Der D-T Betrieb bedarf einer zusätzlichen Genehmigung durch die ASNR (Art. 4).

Des Weiteren ist die ITER IO verpflichtet, alle zehn Jahre eine erneute Sicherheitsüberprüfung durchzuführen (Art. 5). Das Dekret verpflichtet weiterhin die ITER IO dazu, regelmäßige Informationen an die ASNR zu übermitteln (Art. 5 und 6).

Zuletzt enthält das Dekret Regelungen zum Rückbau der Anlage (Art. 7). Für den Rückbau selbst muss, wie bei anderen neuen nuklearen Anlagen, eine Rückbaulizenz beantragt werden. Nach Artikel 16 der ITER-Vereinbarung muss ein Fonds für die Stilllegung eingerichtet werden. In diesem Artikel sind auch weitere Regelungen zum Rückbau festgelegt.

#### **4.4 Japan**

Das japanische Atom- und Strahlenschutzrecht besteht aus einem Mehrebenensystem. Die Grundzüge sind hierbei im Atomenergie-Grundsatzgesetz aus dem Jahr 1955 geregelt. In dessen Art. 3(i) wird Atomenergie als alle Arten von Energie definiert, die von einem Atomkern über Transmutation emittiert wird, und umfasst daher auch die Fusion /KIM 24/. Regulatorisch ist die japanische Nuklearregulierungsbehörde (NRA) für sämtliche Aktivitäten der Atomenergie zuständig, daher auch für die Fusion /KIM 24/.

Fusionsbrennstoffe wie Tritium und Deuterium fallen allerdings nicht unter die Definition des Kernbrennstoffs nach Art. 3(ii) und Fusionsreaktoren fallen nicht unter die Definition des Kernreaktors nach Art. 3(iv), da sich diese auf die Kernspaltung beschränken /KIM 24/. Entsprechend ist auch das japanische Reaktorregulierungsgesetz, welches auf dem Atomenergie-Grundsatzgesetz basiert, nicht auf die Fusion anwendbar /KIM 24/.

Ebenfalls auf dem Atomenergie-Grundsatzgesetz aufbauend ist das Gesetz zur Regulierung radioaktiver Isotope. Das Gesetz bezieht sich hierbei auf eine Definition von Strahlung, welche durch das Kabinettsdekret 325 aus 1957 spezifiziert wird und sich auf Alpha-, Beta- und Gamma- sowie Neutronenstrahlung erstreckt. Die Definition der Radionuklide umfasst Tritium /KIM 24/.

Die bestehenden japanischen Forschungsanlagen, insbesondere JT-60SA, gelten als sonstige Beschleunigeranlagen /KIM 24/. Was unter den Begriff der sonstigen Beschleunigeranlage fällt, wird durch die NRA definiert. Hierbei umfasst sind Plasmaanlagen, die allerdings allein D-D Fusionsanlagen unter die Definition der sonstigen Beschleunigeranlage fassen /KIM 24/.

Um in Japan eine Fusionsanlage zu errichten, bedarf es zunächst eines Antrags. Nach der Errichtungsgenehmigung erfolgt eine Inspektion durch die NRA. Daneben müssen Pläne zum Strahlenschutz und zur Sicherung notifiziert werden.

Für künftige D-T Reaktoren und Kraftwerke besteht eine regulatorische Lücke im japanischen Recht /KIM 24/. Diskutiert werden die Möglichkeiten: Erlass eines Fusionsgesetzes, Erweiterung des Strahlenschutzrechts oder eine Erweiterung des Atomrechts /KIM 24/.



## 5 Gefährdungspotential

Oberstes Ziel der Strahlenschutzregulierung (§ 1 StrlSchG) ist der „Schutz des Menschen und, soweit es um den langfristigen Schutz der menschlichen Gesundheit geht, der Umwelt vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung“. Um dies sicherzustellen, ist es als ersten Schritt notwendig, das Gefährdungspotential zu ermitteln, das von ionisierender Strahlung aus Fusionsanlagen ausgeht.

Für das Gefährdungspotential ist zunächst das in einer Anlage vorhandene radioaktive Inventar maßgeblich. Dabei ist auch zu berücksichtigen, inwieweit dieses Inventar bei zu unterstellenden Ereignisabläufen aus einer Anlage freigesetzt werden kann. Neben der Menge der radioaktiven Stoffe in einer Anlage sind also auch deren physikalische und chemische Form, aber auch mögliche Freisetzungsmechanismen aus der Anlage, soweit heute bereits bekannt, zu berücksichtigen.

Ionisierende Strahlung in Fusionsanlagen kann durch die eigentlichen Fusionsreaktionen, den Zerfall von Radionukliden und durch Beschleunigung/Abbremsen von geladenen Teilchen entstehen.

Im Folgenden werden Informationen über das Radionuklidinventar von Fusionsanlagen und andere Quellen ionisierender Strahlung zusammengestellt. Es wurde dabei auf die wissenschaftliche Literatur zurückgegriffen. Die Abschätzungen sind somit auf die dort behandelten Anlagenkonzepte beschränkt. Die genaue Nuklidzusammensetzung, deren Menge, chemisch-physikalische Form und Verteilung innerhalb der Anlagen hängt wesentlich von der verwendeten Technologie, aber auch den konkreten Designs, den verwendeten Materialien und weiteren Parametern ab, die aktuell insbesondere für Fusionskraftwerkskonzepte noch nicht bekannt sind.

Die folgenden Angaben sollen dazu dienen, einen Überblick über die Größenordnungen der entsprechenden radioaktiven Inventare und damit des radioaktiven Gefährdungspotentials zu erhalten. Mit der weiteren Technologieentwicklung und der Konkretisierung von Anlagendesigns wird es möglich und nötig sein, diese Abschätzungen zu überprüfen und anzupassen.

## 5.1      Physikalische Basis des Gefährdungspotentials, radioaktives Inventar

Das radioaktive Inventar hängt wesentlich von der verwendeten Fusionsreaktion, den verwendeten Strukturmaterialien sowie ggf. den Materialien zur Wärmeabfuhr ab.

Die wesentliche Fusionsreaktion der in Deutschland verfolgten Anlagenkonzepte ist die Fusion von Tritium ( $^3\text{H}$ ) mit Deuterium ( $^2\text{H}$ ) zu Helium und einem Neutron, wobei 17,6 MeV Energie pro Reaktion frei werden.

Das Neutron erhält durch die Reaktion eine kinetische Energie von 14,1 MeV, das Helium-Atom die restlichen 3,5 MeV.



Um 1 GW thermische Leistung in einem Fusionskraftwerk zu erzeugen, sind entsprechend ca.  $3,5 \cdot 10^{20}$  Fusionsreaktionen pro Sekunde notwendig, wobei genauso viele Neutronen erzeugt werden. Dabei werden pro Sekunde ca. 1,8 mg Tritium verbraucht.

Entsprechend werden innerhalb eines Betriebsjahres bei einer konstanten Leistung von 1 GW insgesamt ca. 56 kg Tritium umgesetzt und  $1,1 \cdot 10^{28}$  Neutronen produziert. Diese Zahlen skalieren linear mit der Leistung und mit dem Auslastungsgrad des Fusionskraftwerks.

In Anlagen, in deren Plasma kein bzw. nur sehr wenig Tritium aber Deuterium vorhanden ist, können je nach Plasmabedingungen (Dichte, Temperatur) auch Fusionsreaktionen von zwei Deuteriumatomen signifikant zum Neutronenfeld beitragen:

Diese Reaktionen werden z. B. im W7-X in signifikanter Anzahl im Deuteriumbetrieb auftreten und zum einen zu Neutronenstrahlung, zum anderen zur Produktion des Radionuklids Tritium führen.



### 5.1.1 Direktstrahlung

Durch die Fusionsreaktionen werden hochenergetische Neutronen erzeugt, die eine ionisierende Strahlung darstellen. Da MCF- und ICF-Anlagen die gleiche Fusionsreaktion zu Grunde liegt, tritt diese Strahlung in beiden Anlagentypen auf.

Zusätzlich entsteht in MCF-Anlagen durch die Ablenkung der geladenen Plasmabestandteile (Atomkerne, Elektronen) Bremsstrahlung in Form von Röntgen-/Gamma-Strahlung. Die Heizsysteme selbst sind ebenfalls grundsätzlich Quellen ionisierender Strahlung. So können ICRH und ECRH Störstrahler im Sinne des StrlSchG sein, die je nach Leistungsparameter nach § 12 Abs. 1 Nr. 5 StrlSchG genehmigungspflichtig oder genehmigungsfrei sind. NBI-Heizquellen sind bei Verwendung von Brennstoffgasgemischen auch intensive Quellen von Neutronenstrahlung.

In ICF-Anlagen werden die Bestandteile des Brennstoffpellets durch hochenergetische Laserstrahlung ionisiert und beschleunigt, wodurch ebenfalls Röntgen-/Gamma-Strahlung entsteht.

Die Direktstrahlung ist insbesondere für den betrieblichen Strahlenschutz relevant.

### 5.1.2 Tritium

Tritium ist instabil und zerfällt mit einer Halbwertszeit von 12,32 Jahren in einem Betazerfall unter Emission eines Elektrons:



In Fusionskraftwerken wird Tritium im laufenden Betrieb erbrütet werden müssen, da sonstige Quellen an Tritium nicht ausreichen werden, um den Bedarf von Fusionskraftwerken zu decken /PEA 18/. Aus der Effizienz des Brennstoffkreislaufs, insbesondere der Brutrate, der mittleren Dauer zwischen Erbrüten und Verbrauch von Tritium und anderen Parametern der Brennstoffkreislaufs, wird sich das Tritiuminventar von Fusionskraftwerken ergeben /ABD 20/. Da es momentan noch keinen experimentellen Nachweis für diese Effizienz gibt, können aktuell nur grobe Schätzungen des Tritiuminventars vorgenommen werden.

Im zivilen Bereich gibt es nur sehr wenige Anlagen, die ein Inventar an Tritium besitzen, das eine Größenordnung erreicht, wie sie bei Fusionskraftwerken zu erwarten ist. Die einzigen zivilen Anlagen, die Tritium in relevantem Umfang produzieren, sind Schwerwasserreaktoren des CANDU Typs.

In Deutschland besitzt das Tritiumlabor Karlsruhe eine Lizenz für den Umgang mit bis zu 40 g /WEL 15/ Tritium und ein aktuelles Inventar von ca. 30 g /KIT 26/. Bis zum Jahr 2024 betrug der kumulative Tritiumdurchsatz 31,5 kg /KIT 26/.

Im UK wurden am JET mehrere Versuchskampagnen mit Tritium als Plasmabestandteil durchgeführt. Dieses Tritium wurde im JET Active Gas Handling System gespeichert, bereitgestellt und zurückgewonnen /GEO 24/. Das maximale Inventar betrug dabei 69 g /FEL 25/ bei einem kumulierten Durchsatz von über 1 kg Tritium /GEO 24/.

ITER hat einen Genehmigungsgrenzwert für das maximale Inventar von 4 kg Tritium, siehe Kap. 4.3.

In der Forschungsdemonstrationsanlage SPARC von CFS in den USA soll das Tritiuminventar 10 g betragen /FUSE 25/. Für das erste Demonstrationskraftwerk ARC hat CFS keinen Wert für das Tritiuminventar veröffentlicht, erwartet aber ein niedrigeres Inventar als z. B. den Genehmigungsgrenzwert von ITER /CFS 22/.

Das Tritiuminventar eines Fusionskraftwerks umfasst das in Blanket, Brennstoffkreislauf, Tritium-Extraktionssystemen, Strukturmaterialien und Speichern enthaltene Tritium. Während ältere Studien für das gesamte Anlageninventar Werte von mehr als 5 kg abschätzten /WON 14/, zeigt eine neuere Analyse von EU DEMO, dass durch eine direkte interne Schleife und verbesserte Tritium-Extraktion das operative Inventar des Brennstoffkreislaufs auf weniger als 2 kg reduziert werden kann /SCH 22/.

Eine Strahlenexposition durch Tritium hängt stark von der chemisch-physikalischen Form ab, in der das Tritium vorliegt. Tritium ist sowohl für den betrieblichen Strahlenschutz als auch bei Stör- und Unfällen relevant. Weiterhin sind tritiierte Stoffe für den Anfall von radioaktiven Reststoffen und potentielle radioaktive Abfälle relevant. Schließlich spielt Tritium eine Rolle im Bereich der nuklearen Nichtverbreitung (siehe Abschnitt 5.6.2).

### 5.1.3 Aktivierter und kontaminierter Materialien

Durch die bei Fusionsreaktionen freigesetzten Neutronen werden Materialien in der Umgebung der Fusionsreaktion durch Kernreaktionen aktiviert. Davon betroffen sind feste Strukturen, Flüssigkeiten und Gase/Luft. Außerdem können diese Materialien durch Tritium kontaminiert werden.

#### Strukturen

Sowohl in der MCF als auch in der ICF ist der Raum, in dem die Fusionsreaktionen stattfinden, von festen Strukturen umgeben. Im Fall der MCF vom Vakuumgefäß, bei der ICF von einer Reaktionskammer. Je nach Fusionstechnologie bestehen diese Gefäße aus unterschiedlichen Materialien. Für MCF wird aktuell Wolfram als oberste Schicht der ersten Wand präferiert /LOA 25/, für das Vakuumgefäß selbst Stahl. Für ICF sind noch keine detaillierten Informationen öffentlich verfügbar /HÄF 23/. Die funktionalen Anforderungen unterscheiden sich zwischen MCF und ICF wesentlich. Z. B. ist das Plasma bei ICF-Anlagen auf die Brennstofftablette konzentriert und es findet keine Wechselwirkung zwischen Plasma und Wand statt. In MCF-Anlagen befinden sich, je nach Design, auch verschiedene Komponenten innerhalb des Vakuumgefäßes wie z. B. Brutblankets und Divertor, die direkt der Neutronenstrahlung ausgesetzt sind und durch das im Plasma enthaltene Tritium kontaminiert werden können. Daran schließen sich unterschiedliche Komponenten und Systeme wie Magnete bzw. optische Komponenten, Kühlleitungen usw. an.

Je nach Zusammensetzung dieser Materialien, der verwendeten Bruttechnologie und anderer Designentscheidungen wird eine Vielzahl von Radionukliden im Betrieb entstehen. Um die Zusammensetzung und Menge der produzierten Radionuklide genau quantifizieren zu können, bedarf es detaillierter neutronenphysikalischer Berechnungen.

Die Kontamination der festen Materialien durch Tritium hängt ebenfalls stark von den jeweiligen Bedingungen ab, z. B. von Temperatur, lokaler Tritiumkonzentration, Materialzusammensetzung und -zustand.

Von besonderem Interesse für die Beherrschung von Stör- und Unfällen sind aufgrund ihrer leichteren Mobilisierbarkeit aktivierte und kontaminierte Stäube im Vakuumgefäß bei MCF-Anlagen und aktivierte Korrosionsprodukte in Kühlkreisläufen.

Stäube entstehen während des Betriebs in MCF-Anlagen durch Plasma-Wand-Wechselwirkungen und durch die Einwirkung der Strahlung auf die erste Wand, was zu einem Abtragen von Material von dieser Wand führt. Die genauen Mechanismen der Staubbildung, die Größe und Morphologie der Staubpartikel und die Zusammensetzung der Radionuklide im Staub hängen unter anderem stark von der gewählten Technologie, der Betriebsweise der Anlage und der Materialwahl ab und sind Gegenstand der aktuellen Forschung. ITER besitzt z. B. einen Genehmigungsgrenzwert von 1000 kg Staub im Vakuumgefäß /FRA 12/. Für EU DEMO gibt es ebenfalls Abschätzungen zu einem Staubinventar von ca. 1000 kg im Vakuumgefäß /CAR 22/. Für die im Staub enthaltenen Radionuklide wurden Abschätzungen von /RAS 00/, /RAS 26/, /LUK 20/ und /LUK 21/ berechnet. Insgesamt bestehen noch hohe Unsicherheiten bezüglich der Entstehung und des Verbleibs von Staub.

Inwieweit auch im Falle von ICF-Anlagen relevante Mengen aktivierter bzw. kontaminierter Stäube durch die Erosion der Ersten Wand entstehen können, ist noch zu klären.

Aktiviert Korrosionsprodukte können in Kühlmittleitungen auftreten. Dies betrifft sowohl Wasser als auch Flüssigmetall oder Salzschnmelzen. Auf der Innenseite von Kühlmittleitungen kann es durch die chemische Wechselwirkung zwischen Kühlmittel und Leitungswand zur Bildung von Korrosionsprodukten kommen. Diese Korrosionsprodukte können insbesondere in Bereichen mit hohem Neutronenfluss aktiviert werden. Lösen sich diese Korrosionsprodukte von der Wand, so werden sie vom Kühlmedium durch den Kühlkreislauf transportiert (siehe z. B. /CAR 22/, /TER 22/ und /CAR 24/).

Stäube und aktivierte Korrosionsprodukte sind mobilisierbares Inventar (siehe Abschnitt 5.3.2), sie spielen eine Rolle im betrieblichen Strahlenschutz, sind für Unfallanalysen entscheidend und tragen zur Entstehung von radioaktiven Reststoffen und ggf. radioaktiven Abfällen bei.

## **Gase und Luft**

Neben Tritium als elementarem Gas und als tritierter Wasserdampf ist aktivierte Luft als radioaktives Gas zu berücksichtigen. Die Aktivierungsreaktionen und die Zusammensetzung der aktivierten Luft unterscheiden sich im Grunde nicht von denen in Beschleunigeranlagen, deren Strahlungsfeld durch Neutronen dominiert wird. Typische potentiell relevante Aktivierungsprodukte der Luft mit längerer (> ca. 1 h) Halbwertszeit sind Ar-41 (Halbwertszeit 1,8 h) aus Neutroneneinfangreaktionen am Ar-40, C-14 (Halbwertszeit 5730

Jahre) aus Neutroneneinfangreaktionen am C-13 des CO<sub>2</sub> der Luft sowie Be-10 (Halbwertszeit  $1,6 \cdot 10^6$  Jahre) aus Be-Verunreinigungen.

Darüber hinaus entstehen durch direkte Aktivierung und weitere Reaktionskanäle eine Reihe kurzlebiger (Halbwertszeit < ca. 1 h) Aktivierungsprodukte wie u. a. C-11 (Halbwertszeit ca. 20,4 min), N-13 und N-16 (Halbwertszeit 9,96 min bzw. 7,1 s), O-19 (Halbwertszeit 26,9 s) sowie Fluor- und Chlorisotope, die je nach Neutronenintensität und Dauer durchaus erhebliche Konzentrationen erreichen können.

Außerdem sind Verunreinigungen der Luft mit Korrosionsprodukten aktivierter Materialien und aktivierten Stäuben in Räumen und Ausrüstungen zu berücksichtigen.

Da die Luft in Anlagenräumen aus Strahlenschutzgründen regelmäßig ausgetauscht wird, erfolgt bereits betrieblich eine Abgabe von radioaktiven Stoffen an die Umgebung. Eine Reduzierung der Konzentration und Menge vor Ableitung in die Umgebung erfolgt beispielsweise durch Abkling- und Verzögerungsstrecken.

## **Flüssigkeiten**

Zur Abfuhr der durch die Fusionsreaktionen freigesetzten Energie werden je nach Anlagendesign unterschiedliche Kühlmittel vorgesehen. Durch ihre räumliche Nähe zur Fusionsreaktion sind diese einem intensiven Neutronenfeld ausgesetzt. Außerdem kann es durch Diffusion von Tritium in die Kühlleitungen zu einer Kontamination damit kommen.

Wird Wasser als Kühlmedium eingesetzt, so bildet sich radioaktives N-16 durch eine Kernreaktion von Sauerstoff (O-16) in Wasser mit einem Neutron. N-16 ist ein Emitter harter Gammastrahlung (6,13 MeV und 7,12 MeV) mit einer Halbwertszeit von 7,1 s. Diese Strahlung ist insbesondere beim betrieblichen Strahlenschutz zu berücksichtigen. Durch weitere Kernreaktionen können auch andere Radionuklide, wie z. B. C-14, entstehen, die bei der Entsorgung zu berücksichtigen sind.

Wird flüssiges Metall, z. B. LiPb eingesetzt, so werden einzelne Bestandteile ebenfalls aktiviert. So können verschiedene Bleiisotope durch Neutroneneinfang angeregt werden, was zu Gammastrahlung führt (siehe z. B. /KON 18/). Die so erzeugten Bleiisotope sind teilweise instabil und zerfallen unter Aussendung von Betastrahlung, wobei teilweise auch die Tochterkerne instabil sind und weiter zerfallen bzw. durch den Einfang von Neutronen wieder aktiviert werden. Radionuklide, die auf diese Weise gebildet

werden können, sind z. B. Hg-203 (Halbwertszeit 46,6 Tage) und Po-210 (Halbwertszeit 138,4 Tage). In /MER 19a/ und /MER 19b/ wurde das Inventar für ein Fusionskraftwerk im Gleichgewichtszustand mit ca. 1 g Po-210 abgeschätzt.

Die so entstehenden Radionuklide sind je nach chemischer Bindung und damit Mobilisierungs- und Transporteigenschaften, Halbwertszeit und freigesetzter Strahlungsart und -energie für den betrieblichen Strahlenschutz, die Analysen von Stör- und Unfallabläufen und/oder die Entsorgung relevant.

### **Verunreinigungen**

Die Wichtigkeit einer detaillierten Analyse der Materialzusammensetzung und darauf aufbauend der Analyse der Wirkung des Neutronenflusses auf die Materialien in einer Fusionsanlage zeigt sich an der Berücksichtigung von Verunreinigungen der verwendeten Materialien.

Ein Beispiel dafür ist der Urangehalt von Beryllium. Letzteres war zunächst als Material der Ersten Wand von ITER vorgesehen, soll in verschiedenen Brutblanketkonzepten aber auch als Neutronenmultiplier zum Einsatz kommen. In /NIC 22/ wurde die Literatur zum Urangehalt von Beryllium ausgewertet und von Werten bis zu 100 wppm berichtet. Da die Berylliummasse in Brutblankets im Bereich von hunderten von Tonnen liegen kann, kann die Masse des Urans im kg-Bereich liegen. In Fusionsanlagen kann die hochenergetische Neutronenstrahlung durch Kernreaktionen mit den Uranverunreinigungen zur Bildung von Transuranen und Spaltprodukten führen. In verschiedenen Veröffentlichungen /LON 11/, /CAM 10/, /KOL 16/) werden Maßnahmen diskutiert, durch geeignete technische Maßnahmen, den Urananteil im Beryllium vor dessen Verwendung in einer Fusionsanlage zu reduzieren. Dadurch könnte entsprechend die Menge der entstehenden Transurane und Spaltprodukte verringert werden. In /KIM 20/ wird ein solches Verfahren diskutiert.

Dieses Inventar an Radionukliden ist beim betrieblichen Strahlenschutz, gegebenenfalls bei Stör- und Unfallanalysen sowie bei der Entsorgung zu berücksichtigen. Gegebenenfalls wäre es auch bei einer Spaltmaterialüberwachung von Fusionsanlagen relevant.

## 5.2 Strahlenschutz

Ziele des Strahlenschutzes sind einerseits die Verhinderung deterministischer Strahlenwirkungen sowie andererseits die Reduzierung des Risikos für stochastische Strahlenwirkungen. Um das Risiko für stochastische Strahlenwirkungen auf ein akzeptables Maß zu reduzieren, gelten drei Grundsätze: Rechtfertigung, Dosisbegrenzung und Optimierung. Diese sind in den §§ 6 – 9 des StrlSchG reguliert. Tätigkeiten, durch die Mensch und Umwelt exponiert werden können, müssen gerechtfertigt sein. Zusätzlich ist jede unnötige Exposition von Mensch und Umwelt zu vermeiden und Dosisgrenzwerte dürfen nicht überschritten werden. Zusammengefasst werden diese Grundsätze im ALARA<sup>7</sup> (teilweise auch ALARP)-Prinzip. Im Folgenden werden beruflich strahlenexponierte Personen und die allgemeine Bevölkerung separat betrachtet.

### Beruflich strahlenexponierte Personen

Nach § 78 StrlSchG beträgt der Grenzwert der effektiven Dosis für beruflich strahlenexponierte Personen 20 mSv im Kalenderjahr. In Einzelfällen kann von der zuständigen Behörde eine effektive Dosis von 50 mSv innerhalb von fünf Kalenderjahren zugelassen werden.

In Fusionsanlagen ist beruflicher Strahlenschutz aufgrund unterschiedlicher Strahlungsquellen relevant: Neutronenstrahlung, Beta- und Gamma-Strahlung aus aktivierten Strukturmaterialien und Luft und Tritium. Manche Quellen davon werden mobil sein, andere dagegen immobil. Auch werden in unterschiedlichen Gebäuden einer Fusionsanlage unterschiedliche Strahlenarten hauptsächlich relevant sein.

Notwendige Strahlenschutzmaßnahmen werden je nach Betriebsphase unterschiedlich ausfallen. Im laufenden D-T Betrieb wird bei ITER davon ausgegangen, dass lokale Dosisleistungen am Tokamak-Kühlsystem (TCWS) von einigen zehn Gy/h auftreten werden. Während größerer Wartungsarbeiten können durch den Transport ausgebaute, aktivierter *plasma-facing components* Dosisleistungen von mehreren Hunderten Gy/h auftreten /ABA 25/. Dies stellt Anforderungen an die bauliche Auslegung der Abschirmung sowie die benutzbare Ausrüstung, die entsprechend strahlenresistent sein muss. Arbeiten bei solch hohen Dosisleistungen werden fernhantiert durchgeführt werden

---

<sup>7</sup> As Low As Reasonably Achievable, taking into account economic and societal factors /ICRP 07/.

müssen. Außerdem werden für solche Arbeiten Durch- und Zugänge zwischen/zu Gebäudeteilen nötig sein, wodurch bauliche Strahlenschutzmaßnahmen beeinträchtigt werden können.

Bei ITER wird eine Kollektivdosis von 500 Personen-mSv/a erwartet. Das von ITER festgelegte Limit für die effektive Dosis für eine einzelne Arbeitskraft liegt bei 2,5 mSv/a. Berechnungen zu Arbeiten in der Heißen Zelle bei ITER ergaben, dass der Umgang mit *type A* Abfälle (LLW) zu fast 100 Personen-mSv/a führen kann und Tests am *equatorial port plug* zu etwa 44 Personen-mSv/a /MAR 25/.

Für EU DEMO ist es ein Ziel, eine Kollektivdosis von nicht mehr als 700 Personen-mSv/a zu erreichen. Individuelle effektive Dosen sollen unter 5 mSv/a bleiben /CAR 22/. Dabei wurden Dosisleistungen direkt nach Betriebsende (SDDR, *shutdown dose rates*) berechnet und ausgewertet. Aktiviertes PbLi kann zu Dosisleistungen von mehr als 100 mSv/h führen, was für Wartungsarbeiten Fernhandlungsmaßnahmen notwendig macht. Um Rohrleitungen aus Stahl können Dosisleistungen von mehr als 1 mSv/h auftreten. Ein weiteres Ziel von 10 µSv/h würde in großen Teilen der Räume überschritten werden, da das Rohrleitungssystem in diesem aktuellen und voraussichtlich nicht finalen Anlagen-design nur wenig abgeschirmt ist.

### **Allgemeine Bevölkerung**

Aus Fusionsanlagen werden radioaktive Stoffe mit Luft und Wasser abgeleitet werden. Für eine Einzelperson der Bevölkerung darf dafür ein Grenzwert für die effektive Dosis von 0,3 mSv im Kalenderjahr nicht überschritten werden, § 99 StrlSchV.

Als Summe der Expositionen aus genehmigungs- oder anzeigebedürftigen Tätigkeiten darf nach § 80 StrlSchG insgesamt ein Grenzwert der effektiven Dosis von 1 mSv für eine Einzelperson der Bevölkerung nicht überschritten werden.

Für ITER sind maximale Tritiumableitungen als Gas von 220 TBq/a in Jahren mit Plasmabetrieb und von 900 TBq/a in Jahren mit größeren Wartungsarbeiten im Antrag angegeben. Zum Vergleich geben die kerntechnischen Anlagen in La Hague etwa 50 TBq/a ab und ein Druckwasserreaktor etwa 1 TBq/a. Im Fluss Durance in der Nähe des ITER-Geländes wird mit einer Tritium-Kontamination von 30-40 Bq/l gerechnet /ABA 25/.

### **5.3 Sicherheit**

Auch für Stör- und Unfälle muss der Anlagenbetreiber nachweisen, dass es zu keiner unzulässigen Exposition des Betriebspersonals und der Bevölkerung kommt. Unbeschadet der genauen technischen Anforderungen an diesen Nachweis geschieht dies durch die Betrachtung von sogenannten auslösenden Ereignissen und den sich daraus ergebenden Ereignisabläufen.

Bei diesen Analysen wird zunächst das radioaktive Inventar, dessen Mobilisierbarkeit und der Transport/die Ausbreitung innerhalb der jeweils betroffenen Gebäude betrachtet. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist eine Analyse von konkreten Ereignisabläufen praktisch nicht möglich, da hierfür detaillierte Anlagenkonzepte vorliegen müssen. Für eine vorläufige Abschätzung des Freisetzungspotenzials können in der Anlage vorhandene gespeicherte Energien und Möglichkeiten zu deren Freisetzung analysiert werden. Im Ergebnis wird der sogenannte Quellterm bestimmt, der die Freisetzung in die Umgebung außerhalb der Anlagegebäude angibt. Anschließend wird dessen Ausbreitung und Transport in der Umwelt und die Aufnahme im Menschen berechnet und daraus die Dosis der Bevölkerung außerhalb des Anlagengeländes bestimmt.

#### **5.3.1 Möglichkeiten der Mobilisierung von radioaktiven Inventaren**

Im Kapitel 5.1 wurden die physikalischen Grundlagen des Gefährdungspotentials beschrieben. Für die Analyse der Gefährdung der Bevölkerung ist insbesondere bei Stör- und Unfällen die Gefährdung durch den Teil des radioaktiven Inventars, der freigesetzt und in der Umwelt weitertransportiert wird, entscheidend.

Das radioaktive Inventar ist im bestimmungsgemäßen Betrieb innerhalb von Komponenten und Systemen der Anlage eingeschlossen. Stör- und Unfälle können dazu führen, dass das radioaktive Inventar aus diesen Komponenten bzw. Systemen heraus mobilisiert wird. Der erste Schritt des oben beschriebenen Ablaufs der Analyse von Stör- und Unfällen ist es, zu bestimmen, welcher Anteil des radioaktiven Inventars mobilisiert werden kann.

Gründe für die Mobilisierung radioaktiver Stoffe können insbesondere Freisetzungen von in der Anlage gespeicherten Energien sein, für die nachfolgende Beispiele genannt seien, die im Wesentlichen auf Tokamak-Daten des DEMO-Konzeptes basieren. Ob und über welche Szenarien solche Energien zu einer Mobilisierung von radioaktiven Stoffen

führen können, ist dabei noch weiter zu untersuchen. Sowohl gespeicherte Energien als auch Freisetzungsmechanismen können sich für verschiedene Technologien und deren konkrete Umsetzung in ein Anlagendesign erheblich unterscheiden. Im Falle von ICF liegen beispielsweise keinerlei gespeicherte magnetische Energien vor. Auch die im Plasma gespeicherte thermische Energie wird bei ICF-Anlagen durch die viel geringere Größe des bei der Zündung eines Brennstofftargets entstehenden Plasmas deutlich geringer sein als bei MCF-Anlagen. Die im Tokamak gespeicherte, erhebliche magnetische Plasmaenergie ist bei Stellaratoren praktisch nicht vorhanden. Alle Technologien, die DT-Fusion durchführen, werden hingegen Brutblankets benötigen mit den dort gespeicherten Energien.

In Tab. 5.1 sind für zwei EU DEMO Modelle mit unterschiedlichen Brutblanketdesigns solche Energiewerte aufgeführt /CAR 22/. Durch den Zerfall von aktivierten Materialien werden direkt nach dem Stopp der Fusionsreaktionen noch ca. 1 – 2 % der thermischen Reaktorleistung freigesetzt. Im Laufe der Zeit reduziert sich dieser Wert, nach einer Woche beträgt er noch ca. 0,1 % /CAR 22/. Auch andere Untersuchungen (z. B. /HUM 23/, /TAY 14/, /NAK 14/) zeigten, dass durch den Nachzerfall der aktivierten Materialien Wärme in dieser Größenordnung freigesetzt wird.

**Tab. 5.1** In EU DEMO freisetzbare Energien<sup>8</sup> /CAR 22/.

| Energiequelle                                                                     | Energie      |        |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------|
| Thermische Energie des Plasmas                                                    | 1,3 GJ       |        |
| Magnetische Energie (toroidale Spulen)                                            | 120 – 147 GJ |        |
| Magnetische Energie (poloidale Spulen)                                            | 20 GJ        |        |
| <b>Summe der thermischen Energie</b><br>(abhängig vom Brutblankettyp/-kühlmittel) | HCPB         | WCLL   |
|                                                                                   | 95 GJ        | 791 GJ |

Über die in Tab. 5.1 genannten gespeicherten Energien hinaus ist die im Plasma gespeicherte magnetische Energie zu berücksichtigen, die für ITER /ITER 99/ und EU DEMO /WEN 17/ in der Größenordnung von 1 – 2 GJ angegeben wird.

Die Freisetzung gespeicherter Energie kann – je nach Art, Umfang und Ablauf des Ereignisses sowie abhängig davon, ob sie kontrolliert oder unkontrolliert erfolgt – zu

---

<sup>8</sup> Zum Vergleich: 1 kg TNT hat einen Energieinhalt von 4,184 MJ

Phasenumwandlungen von Kühlmitteln oder Strukturmaterialien (z. B. Schmelzen oder Verdampfen), zum Versagen von Barrieren und somit zur Mobilisierung und zum Transport radioaktiver Stoffe führen.

Für das Tritiuminventar, das nicht in Strukturen gebunden ist, für aktivierte/kontaminierte Stäube und aktivierte Korrosionsprodukte und andere Bestandteile von Kühlmedien kann konservativ angenommen werden, dass jeweils das ganze Inventar mobilisierbar ist. Für Strukturkomponenten kann zunächst davon ausgegangen werden, dass diese nicht mobilisiert werden. Für das in Strukturen gebundene Tritium sind detaillierte Analysen notwendig.

Das Vorgehen bei der Ermittlung von auslösenden Ereignissen und der Analyse von Ereignisabläufen wurde z. B. in /RAE 16/ ausführlich beschrieben. In EU DEMO wurde die funktionale Fehlermöglichkeits- und Auswirkungsanalyse (FFMEA) als Analyseinstrument für die Definition der auslösenden Ereignisse für Stör- und Unfallabläufe (*postulated initiating events, PIE*) gewählt, da keine ausreichenden Designdetails vorliegen, die eine genauere Bewertung auf Bauteilebene ermöglichen würden /PIN 17/. Im Rahmen der FFMEA wird eine ausführliche Liste der PIE ausgewählt, die in Bezug auf die Anlagensicherheit als repräsentativste Ereignisse dargestellt sind.

### **5.3.2 Vergleich mit anderen strahlenschutzregulierten und kerntechnischen Anlagen**

Nach § 104 Abs. 3 StrlSchV ist bei der Planung von baulichen oder technischen Schutzmaßnahmen zur Begrenzung der Exposition bei Störfällen durch die Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Umgebung das potentielle Schadensausmaß zu berücksichtigen. Die Genehmigungsbehörde legt Art und Umfang der Schutzmaßnahmen unter Berücksichtigung des Einzelfalls, insbesondere des Gefährdungspotenzials der Anlage und der Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Störfalls, fest. Entsprechend ist es notwendig, eine Möglichkeit zum Vergleich des Gefährdungspotentials unterschiedlicher Anlagen zu finden, um die Angemessenheit der Schutzmaßnahmen, auch im Vergleich zwischen verschiedenen Anlagen, beurteilen zu können.

Ein Ansatz für einen derartigen Vergleich wird in diesem Abschnitt dargestellt. Mangels belastbarer Aussagen zu den zu erwartenden Häufigkeiten von Stör- und Unfällen in zukünftigen Anlagenkonzepten fokussiert sich dieser Ansatz auf einen Vergleich der in den Anlagen vorhandenen mobilisierbaren Inventare. Dabei wird das Inventar von

Fusionsanlagen einerseits mit dem Inventar von Hochradioaktiven Strahlenquellen (HRQ), die in Deutschland unter dem StrlSchG reguliert werden, und andererseits mit Inventaren aus kerntechnischen Anlagen, die in Deutschland unter dem AtG reguliert werden, verglichen.

Wie in Abschnitt 5.1 beschrieben, ist für die Gefährdung der Bevölkerung durch ionisierende Strahlung aus Fusionsanlagen bei Störfällen das radioaktive Inventar entscheidend. Dabei ist neben der Aktivität der Radionuklide auch deren Radiotoxizität sowie ihre Mobilisierbarkeit bei verschiedenen Ereignisabläufen zu berücksichtigen. In der StrlSchV wird dazu das Verhältnis (Vielfache) der Aktivität von Radionukliden zu ihrer Freigrenze nach Anlage 4 Tabelle 1 Spalte 2 verwendet. Die Freigrenze ist die Aktivität bis zu der mit dem jeweiligen Radionuklid genehmigungsfrei umgegangen werden darf. Der Bestimmung der Freigrenzen liegen bestimmte Szenarien zugrunde, bei denen auch Transportmechanismen und die Radiotoxizität eine Rolle spielen. Besteht das radioaktive Inventar einer Anlage aus mehr als einem Radionuklid, so wird die Summe der Vielfachen der Freigrenzen verwendet, siehe Gleichung (5.5).

$$\sum_i \frac{A_i}{FG_i} \quad (5.5)$$

$A_i$       Aktivität von Nuklid  $i$  [Bq]  
 $FG_i$       Freigrenze von Nuklid  $i$  [Bq]

Das BfS führt das „Register über hochradioaktive Quellen“ in Deutschland. In /MOT 12/ sind die typischen und maximalen Werte des Inventars hochradioaktiver Quellen nuklid-spezifisch für unterschiedliche Anwendungsgebiete mit Stand Februar 2012 veröffentlicht.

Als weiteres Beispiel für hochradioaktive Quellen dient die Cs-137 Strahlenquelle, aus der es zu Freisetzungen während eines Unfalls der INES Stufe 5 in Goiânia, Brasilien im Jahr 1987 kam /IAEA 88/.

Schutzmaßnahmen gegen eine Exposition der Bevölkerung bei Stör- und Unfällen von kerntechnischen Anlagen werden durch ein eigenes untergesetzliches kerntechnisches Regelwerk näher bestimmt. Für Anlagen, die im StrlSchG genehmigt werden, gibt es ein solch ausformuliertes untergesetzliches Regelwerk nicht. Um einen Vergleich des Gefahrenpotentials der verschiedenen Anlagen und Umgänge durchführen zu können,

wurde anhand der Kriterien von der §§ 104 Abs. 4 und 106 Abs. 3 für alle Anlagen und Umgänge die gleiche Metrik zur Bestimmung des radiologischen Gefährdungspotentials angewendet, nämlich die Summe der Vielfachen der Freigrenzen.

In /SSK 02/ ist das Inventar eines Kernkraftwerks mit Druckwasserreaktor und 3950 MW thermischer Leistung zu verschiedenen Zeiten nach Auslösen der Reaktorschnellabschaltung aufgeführt (0 h, 1 h, 6 h, 24 h, 120 h, 240 h). Für den Vergleich hier wurde eine Zeit von 24 Stunden gewählt. Der Wert der Summenformel reduziert sich innerhalb der gegebenen Zeitintervalle um ca. den Faktor 0,5, der genaue Zeitpunkt nach Reaktorschnellabschaltung ist also für den Vergleich hier, der sich auf die Größenordnungen des vorhandenen Inventars bezieht, nicht relevant.

Unter die kerntechnische Regulierung fallen auch Forschungskernspaltungsreaktoren. Dazu wurden veröffentlichte Inventare von Forschungsreaktoren mit thermischen Leistungen von ca. 250 kW /RÄT 20/, 10 MW /ULL 09/ und 20 MW /TRA 26/ berücksichtigt. Vergleichbare Forschungsreaktoren waren oder sind in Deutschland in Betrieb.

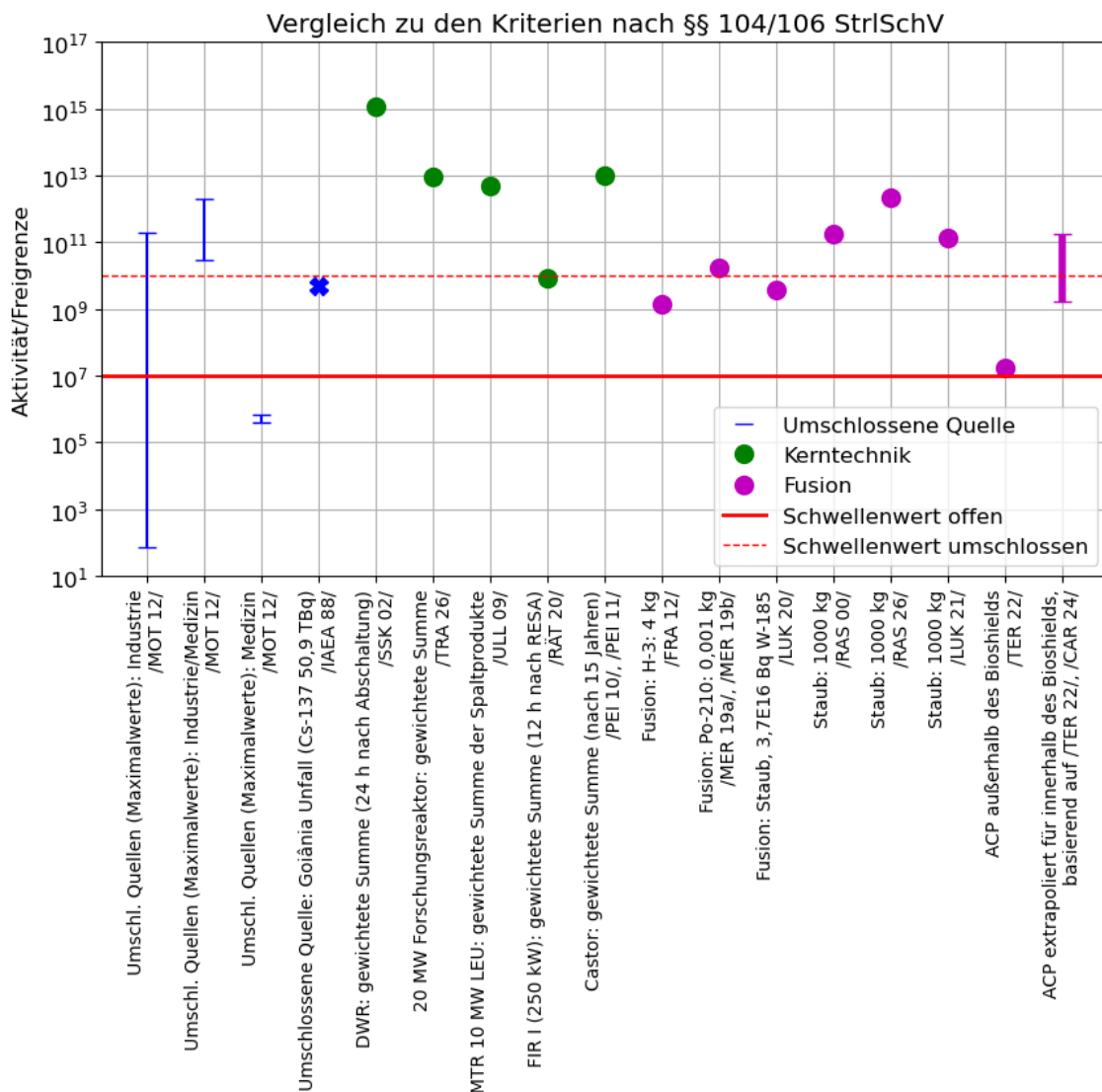
Als zusätzlicher Vergleich wurde das Inventar an abgebrannten Brennelementen eines prototypischen Castorbehälters verwendet /PEI 10/ und /PEI 11/.

Diese Inventare werden in Abb. 5.1 mit den in Abschnitt 5.1 beschriebenen Literaturwerten für Fusionsanlagen verglichen: dem ITER-Genehmigungsgrenzwert für Tritium, für Po-210 als Nebenprodukt in Brutblankets, verschiedenen Abschätzungen für radioaktive Stäube in ITER bzw. EU DEMO Konzepten, und Abschätzungen für aktivierte Korrosionsprodukte (ACP) auf Basis von Veröffentlichungen zu EU DEMO und ITER.

Es sei darauf hingewiesen, dass alle Werte für Fusionsanlagen auf Untersuchungen und Auslegungsdaten von MCF-Anlagen des Typs Tokamak beruhen. Speziell für diesen Typ an Fusionsanlagen ist bisher im Bereich der Sicherheitstechnik die umfangreichste Literatur verfügbar. Nicht berücksichtigt wurde der Anteil der aktivierten Strukturmaterialien, da für diesen Vergleich vereinfachend angenommen wurde, dass ihre Mobilisierbarkeit deutlich kleiner ist als die der anderen betrachteten Materialien.

Zusätzlich sind in Abb. 5.1 die Schwellenwerte der §§ 104 Abs. 4 und 106 Abs. 3 StrlSchV eingezeichnet, ab denen auch für nicht kerntechnische Anlagen und Umgänge Vorsorge für Not- und Störfälle getroffen werden muss: Dieser Schwellenwert beträgt  $10^{10}$  für umschlossene und  $10^7$  für offene radioaktive Stoffe. Dadurch wird die

unterschiedliche Mobilisierung- und damit Freisetzbarkeit von offenen und umschlossen radioaktiven Stoffen berücksichtigt.



**Abb. 5.1** Vergleich radioaktiver Inventare von Anlagen unter Strahlenschutz bzw. Kerntechnikregulierung mit Literaturwerten für Fusionsanlagen

Der Vergleich der Vielfachen der Freigrenzen der unterschiedlichen Anlagentypen zeigt, dass hochradioaktive Quellen den zu betrachtenden Schwellenwert für umschlossene radioaktive Stoffe um maximal den Faktor  $10^3$  überschreiten. Das Inventar eines DWR liegt um ca. den Faktor  $10^8$  über dem Schwellenwert für offene radioaktive Stoffe, Forschungsreaktoren liegen im Bereich von  $10^3$  bis  $10^6$  über dem Schwellenwert für offene radioaktive Stoffe. Das berücksichtigte Inventar von Fusionsanlagen überschreitet die Freigrenze für offene radioaktive Stoffe um Faktoren zwischen 1 und  $10^5$ . Bei den hier verglichenen Literaturwerten für die Inventare zeigt sich, dass das Verhältnis von

Inventar zu Freigrenze von aktiviertem Staub deutlich über dem von Tritium liegt. Insgesamt liegt das Inventar von Fusionsanlagen damit um einige Größenordnungen unter demjenigen von Kernkraftwerken und eher im Bereich von Forschungsreaktoren oder sehr großen Hochradioaktiven Strahlenquellen.

### **5.3.3 Quellterme**

Für die Abschätzung eines Gefährdungspotentials lässt sich eine Unterscheidung zwischen solchem für die beruflich exponierten Personen innerhalb der Anlage und für die Bevölkerung und die Umwelt treffen.

Hinsichtlich letzterem wird der Quellterm aus der Anlage relevant. Ein solcher versteht sich als Quelle von Radionukliden, die in die Umgebung freigesetzt werden, wobei der Quellterm die Quellstärke und deren zeitlichen Verlauf impliziert. Zwar werden im bestimmungsgemäßen Betrieb Radionuklide abgeleitet, dennoch wird nach allgemeinem Verständnis der Begriff Quellterm für die Freisetzungen nach Stör- und Unfallsequenzen verwendet.

Die wichtigen radiologischen Quellterme einer Fusionsanlage bestehen aus Tritium, Stäuben und aktivierten Korrosionsprodukten /CAR 22/. Das Tritium liegt typischerweise gasförmig in verschiedenen Spezies vor ( $\text{HT}$ ,  $\text{T}_2$ ,  $\text{HTO}$ ,  $\text{T}_2\text{O}$  bzw. als organische Verbindung wie  $\text{CH}_3\text{T}$ ). Die Entstehung von Stäuben und ACPs sind in Abschnitt 5.1.3 beschrieben.

## **5.4 Stilllegung und Entsorgung**

Während des Betriebes und beim Rückbau von Fusionsanlagen werden radioaktive Reststoffe und Abfälle erzeugt (werden). In welchen Mengen, welche (radioaktiven) Reststoffe und Abfälle anfallen werden, ist aktuell noch unsicher. Konkrete Designs für Fusionskraftwerke liegen noch nicht vor, außerdem hängen Annahmen zur Erzeugung radioaktiver Reststoffe von der Verfügbarkeit geeigneter und zum Teil noch zu entwickelnder Materialien ab. Nachfolgende Betrachtungen stützen sich auf Untersuchungen aktueller Anlagen und Designs sowie der vorläufigen Designentwürfe zukünftiger Anlagen wie EU DEMO.

Nach § 9a AtG sind radioaktive Reststoffe schadlos zu verwerten oder als radioaktive Abfälle geordnet zu beseitigen. Momentan ist noch nicht klar, welche Stoffe einer

Fusionsanlage als radioaktive Reststoffe verwertbar sein werden und welche als radioaktive Abfälle beseitigt werden müssen. Daher wird im Folgenden, wo nötig, sowohl auf radioaktive Reststoffe als auch auf radioaktive Abfälle eingegangen.

#### **5.4.1 Abfallklassifikation und -inventare**

Radioaktive Abfälle aus Fusionsanlagen werden sich erheblich von Abfällen aus Kernspaltungskraftwerken unterscheiden. Radioaktive Abfälle werden in Fusionsanlagen einerseits dadurch entstehen, dass mit Tritium umgegangen wird und dieses in Materialien eindringt bzw. darin erzeugt wird. Andererseits werden Strukturmaterialien und weitere Stoffe durch Wechselwirkungen mit hochenergetischen Neutronen aktiviert. In internationalen Studien wurden dazu bisher vor allem ITER und mögliche DEMO-artige Kraftwerke untersucht. Die laufende Forschung an Strukturmaterialien zielt u. a. darauf ab, diese Aktivierung zu reduzieren. Dadurch soll die mögliche Entstehung hochradioaktiver und langlebiger Radionuklide verhindert werden.

In /IAEA 09/ werden von der IAEA sechs Abfallklassen in Abhängigkeit von Halbwertszeit und Aktivitätsinhalt von Stoffen definiert: *exempt waste* (EW), *very short lived waste* (VSLW), *very low level waste* (VLLW), *low level waste* (LLW), *intermediate level waste* (ILW) und *high level waste* (HLW). Für keine dieser Klassen werden konkrete Werte genannt, die eingehalten werden müssen, um entsprechend eingeordnet zu werden. Vielmehr werden mögliche Klassifikationskriterien allgemein beschrieben. EW erfüllt Bedingungen, um unter Beachtung einer dadurch verursachten erwarteten effektiven Dosis von maximal 10  $\mu\text{Sv/a}$  für Einzelpersonen freigegeben zu werden. VSLW sind Abfälle, die nach kurzer Abklinglagerung freigegeben werden können. Diese stammen häufig aus industriellen oder medizinischen Anwendungen. VLLW erfüllt die Bedingungen zur Freigabe nicht, erfordert aber keinen längeren Einschluss und Isolierung und kann daher grundsätzlich oberflächennah endgelagert werden. Als Beispiel werden hier Erde und Schutt mit niedrigen Aktivitätskonzentrationen genannt. Im Gegensatz zu VLLW, wird für LLW ein sicherer Einschluss und die Trennung von der Biosphäre für bis zu einige hundert Jahre benötigt. Hierunter können mit kurzlebigen Nukliden und höheren Aktivitätskonzentrationen kontaminierte Materialien fallen oder auch solche mit längerlebigen Radionukliden und dafür niedrigeren Aktivitätskonzentrationen. Für ILW werden höhere Anforderungen an Einschluss und Isolierung nötig als für LLW, sodass diese Abfälle grundsätzlich nicht oberflächennah entsorgt werden können, sondern in einigen hundert Metern Tiefe entsorgt werden müssen. HLW umfasst Abfälle mit hohen Aktivitätskonzentrationen, die zudem viel Wärme abgeben, sodass die Auswirkung der

Wärmefreisetzung bei der Entsorgung in Betracht gezogen werden muss. Die international anerkannte Entsorgungsoption für die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen in mindestens einigen hundert Metern Tiefe.

Basierend auf bisherigen Studien wird davon ausgegangen, dass durch den Betrieb und den Rückbau von Fusionsanlagen relevante Mengen schwach- und mittelradioaktiver Abfälle anfallen werden. Feste Abfälle bestehen aus großen Mengen radioaktiver Metalle (Strukturmaterialien). Ihre Oberflächen können außerdem in hohem Maß mit Tritium, aktivierten Stäuben und aktivierten Korrosionsprodukten kontaminiert sein. Manche dieser Abfälle können in einigen Staaten als LLW oberflächennah endgelagert werden. Vorhandene oberflächennahe Endlagerkapazitäten sind jedoch bislang beschränkt, sodass es in der Fusionsforschung zunehmend einen Fokus darauf gibt, die Menge der Abfälle zu reduzieren und aktivierte Materialien nach einigen Jahrzehnten wieder zu verwerten oder freizugeben.

Für eine EU DEMO-Anlage wurden zum Beispiel folgende Anforderungen in Bezug auf die Abfälle formuliert /ROS 24/:

- Die DEMO-Anlage muss die Menge der generierten radioaktiven Abfälle auf ein Minimum reduzieren (z. B. durch Anwendung des Kriteriums "So niedrig wie vernünftigerweise möglich" für die Materialauswahl, geeignete Strahlenabschirmung, Abfalltrennung und Vorbereitung für die Wiederverwertung in den heißen Zellen der aktiven Wartungseinrichtung und langfristige Abfallimmobilisierung),
- die DEMO-Anlage soll Abfälle, die langfristig geologisch entsorgt werden müssen, minimieren,
- die DEMO-Anlage muss in der Lage sein, Tritium effizient von Strukturen, Flüssigkeiten und Fernbedienungsanlagen zu entfernen (Minimierung der Abfälle aus verbrauchten Komponenten).

In /GON 22/ werden mögliche anfallende radioaktive Inventare verschiedener Prototyp-Studien von Fusionsreaktoren beschrieben und wie diese in verschiedenen Ländern klassifiziert würden. Dies wird im Folgenden näher beschrieben.

Um langlebige radioaktive Abfälle zu vermeiden bzw. die möglicherweise anfallenden Volumen zu reduzieren, muss bei der Auswahl der Materialien einer Fusionsanlage auf die Zusammensetzung z. B. verwendeter Stähle geachtet werden. In /ELB 24/ ist als Empfehlung angegeben, dass radioaktiver Abfall minimiert werden solle. Jegliches

Material und Verunreinigungen darin, die zu hoch-radioaktiven langlebigen Abfällen führen würden, sollten vermieden werden. So sollten Radionuklide wie C-14, Ni-59, Nb-94 vermieden werden. Dafür wird unter anderem an sogenannten niedrig-aktivierbaren ferritisch-martensitischen Stählen (z. B. EUROFER97) geforscht.

Nach jahrzehntelanger Forschung an diesen Stählen kommen /BAI 21/ zur Einschätzung, dass viele dieser Stähle auch 100 Jahre nach Abschaltung eines DEMO-artigen Kraftwerks in vielen Ländern als mittelfradioaktiver Abfall entsorgt werden müssten. Besonders Beta- und Gamma-Aktivitäten verschiedener Stähle sorgen in den in /BAI 21/ aufgeführten Modellrechnungen dafür, dass sowohl der Vakuumbehälter als auch das Brutblanket auf teilweise mehrere Jahrhunderte nicht die Kriterien für schwachradioaktive Abfälle im UK oder in Spanien erfüllen. In Tab. 5.2 sind aus /GON 22/ und /BAI 21/ zusammengestellte relevante Radionuklide mit den jeweiligen Halbwertszeiten angegeben.

**Tab. 5.2** Für Entsorgung relevante Radionuklide und ihre Halbwertszeiten

| Isotop | Halbwertszeit in Jahren |
|--------|-------------------------|
| C-14   | 5730                    |
| Fe-55  | 2,7                     |
| Ni-59  | 75.000                  |
| Ni-63  | 100                     |
| Co-60  | 5,3                     |
| Mo-93  | 3500                    |
| Nb-94  | 20.000                  |
| Tc-99  | 210.000                 |

In vielen Brutblanket-Designs wird Beryllium verwendet. Davon abgesehen, dass Beryllium toxisch ist, enthält es auch häufig Spuren von Uran. Würden 300–400 Mg Beryllium im Brutblanket jeweils 20-100 wppm Uran enthalten, so ergäbe dies in der Summe 6–40 kg Uran (/GON 22/).

In einer Studie zum geplanten Fusionstestreaktor STEP im UK kommen die Forschenden auf eine Aktivität von etwa  $8 \cdot 10^{17}$  Bq oder 2,2 kg Tritium, das in STEP möglicherweise nach Betriebsende gespeichert bliebe /GIL 17/. /GON 22/ gehen davon aus, dass Tritium aus den Abfällen von Fusionsreaktoren entfernt werden wird. Dies soll nicht nur geschehen, um es möglicherweise als Brennstoff wieder zu verwerten, sondern auch um nach einer Endlagerung die Freisetzung in die Umwelt zu vermeiden. Trotzdem nehmen

sie an, dass der Abfall erst nach einer Abklinglagerung von 50 Jahren sicher entsorgt werden kann, aufgrund ansonsten möglicher Freisetzungen von Tritium in die Umwelt.

### **Abfallabschätzungen für EU DEMO**

Da es noch unterschiedliche Konzepte mit unterschiedlichen Materialien zu EU DEMO gibt, ist noch nicht genau absehbar, welche Reststoffe und Abfallströme während Betrieb und Rückbau zu erwarten wären. Zusätzlich gibt es noch keine Entscheidung über den Standort, so dass auch noch nicht klar ist, wie mögliche Abfallströme klassifiziert würden.

In Anlehnung an das Klassifizierungssystem der IAEA wird für DEMO eine vorläufige Klassifizierung der radioaktiven Abfälle in nicht-aktive Abfälle (NAW, entsprechend EW), sehr schwachaktive Abfälle (VLLW), schwachaktive Abfälle (LLW), mittelaktive Abfälle (ILW) und hochaktive Abfälle (HLW) vorgeschlagen.

Einen großen Teil der radioaktiven Materialien werden aktivierte Stähle ausmachen. Zusätzlich werden Materialien mit Tritium kontaminiert sein. In /GIL 17/ werden Bauteile verschiedener EU DEMO Konzepte auf ihre möglichen Aktivierungen untersucht. Ein Ergebnis der Simulationen dort zeigt, dass selbst nach 100 Jahren Abklingzeit nach Ende der Laufzeit von 22,3 Jahren noch zehntausende an Tonnen Materialien von DEMO im UK nicht als LLW sondern als ILW klassifiziert werden müssten und somit nicht oberflächennah endgelagert werden könnten. Besonders der Vakuumbehälter bleibt für mehrere hundert Jahre nach Abschaltung ILW.

Für die Komponenten im Vakuumbehälter (*in-vessel components* (IVC) wie Brutblanket und Divertor) wird EUROFER97 mit reduzierter Aktivierung als Strukturmaterial angenommen. Diese Komponenten werden regelmäßig ersetzt werden und dadurch werden während der Anlagenlebensdauer des Reaktors erhebliche Mengen an mittelaktiven und schwachaktiven Abfällen erzeugt werden. Das Brutblanket, in dem das Tritium erbrütet wird, muss wegen des hohen Verschleißes voraussichtlich alle fünf Jahre ausgetauscht werden. Der Divertor, der den intensiven Wärme- und Teilchenstrom des Plasmas zu bewältigen hat, wird alle 1-2 Jahre ausgetauscht werden. Zum DEMO-Fernwartungskonzept (*remote maintenance*) gehören die Entnahme der Komponenten aus dem Vakuumbehälter, der Transport zur aktiven Wartungseinrichtung (*active maintenance facility* (AMF)), wo Brutblanket/Divertor dekontaminiert und für die Lagerung als radioaktiver Abfall vorbereitet werden, und die Vorbereitung und Einbau des neuen Brutblankets/Divertors /BAC 22/. Bei EUROFER97 ist die Nb-94-Produktion zwar deutlich

geringer ausgeprägt als in typischen austenitischen Stählen, allerdings ist sie immer noch signifikant. Stahlabfälle, die Nb-94 mit einem Gehalt von mehr als 100 Bq/g enthalten, wären kaum in Oberflächenlagern für schwachaktive Abfälle zu akzeptieren. Diese Materialien müssten dementsprechend etwa 100 bis 200 Jahre zwischengelagert werden, bis sie gefahrlos wiederverwendet werden könnten. Durch um 90 % für Nb, 5 % für N und 15 % für Ni verminderte Konzentrationen in EUROFER kann erreicht werden, dass HCPB-Komponenten in der französischen Klassifikation bereits nach wenigen Jahren von ILW zu LLW werden statt nach mehr als 100 Jahren ohne diese Verminderungen /ROS 24/.

Die erwartete gesamte Aktivität der HCPB-Blanket-Module beträgt 1 Sekunde nach der Abschaltung etwa  $9,22 \cdot 10^{19}$  Bq und verringert sich nach 100 Jahren auf  $1,37 \cdot 10^{17}$  Bq /PAR 21/. Wolfram- und EUROFER-Strukturen würden das LLW-Niveau nach britischer Klassifizierung nach 50 bzw. 200 Jahren erreichen.  $\text{Be}_{12}\text{Ti}$  bleibt bis zu 1000 Jahren als ILW klassifiziert. Abhängig von der Position des Blankets werden ~75 Mg Brüterkeramik nach einer Woche Abklingen zu LLW. Es gibt dann keinen Unterschied in den Massen der Abfälle während der Abklingzeit bis zu 500 Jahren, unabhängig von Design und möglichen Uran-Verunreinigungen in  $\text{Be}_{12}\text{Ti}$ . Die Kriterien für die Einstufung der Abfälle in die Gruppen der schwach- und mittelaktiven Abfälle nach der britischen Klassifizierung sind: die Abfälle werden als LLW eingestuft, wenn ihre Aktivität 4 MBq/kg an Alpha-Aktivität oder 12 MBq/kg an (Beta und Gamma)-Aktivität unterschreitet und als ILW, wenn sie einen dieser Werte überschreiten.

Vakuumbehälter und Magnetspulen werden ebenfalls zum Abfallinventar beitragen. Aus diesen Bereichen wird eine Mischung aus ILW und LLW anfallen. Der Vakuumbehälter und ex-vessel Bereiche sollen aus austenitischen nichtrostenden Stählen AISI 316LN und XM19 konstruiert werden, die im Betrieb auch aktiviert werden. Dadurch werden voraussichtlich große Mengen an Abfällen anfallen, von denen einige über 1000 Jahre lang radioaktiv bleiben. Bei 316LN wird der relativ hohe Nickelgehalt (~12,5 Gew.-% Ni) die für Stilllegung, Recycling und Entsorgung relevante Aktivierung dominieren. Von besonderem Interesse sind die langlebigen Isotope Ni-63 und Ni-59, aber auch die Gamma-emittierenden Isotope Nb-94 und Mo-93 würden Schwierigkeiten bei der Entsorgung von schwach radioaktiven Abfällen (LLW) und/oder der Freigabe von bestrahltem 316LN verursachen /GON 22/.

Das langlebige Radionuklid C-14 entsteht bei der Reaktion von O-Isotopen (O-17, O-18) bzw. N-14 mit hochenergetischen Neutronen. Im Falle von Wasser in Water Cooled

Lithium Lead (WCLL) Blankets und Divertoren oder sauerstoffreichen Materialien wie KALOS in Helium Cooled Pebble Bed (HCPB) Blankets ist die C-14-Produktion zu bewerten /KAN 25/. Die Vorhersage der C-14-Menge, die in Materialien während des Betriebs eines Fusionskraftwerks entstehen würde, ist entscheidend für die Bewertung der Gefahrenstufen während des Abfallrecyclings und der Entsorgung. Große Unterschiede und Unstimmigkeiten wurden in verschiedenen nuklearen Datenbibliotheken festgestellt, sodass experimentelle Validierungen erforderlich sind.

Flüssige Abfälle von EU DEMO stammen z. B. möglicherweise aus:

- Kontaminiertem Kühlmittel (Wasser):
  - dem mit Tritium kontaminierten Abwasser bei Wartung (Wasser als Kühlmittel in WCLL und Divertor),
  - C-14 aus der Aktivierung von O-17 im Kühlmittel (WCLL),
  - Activated Corrosion Products (ACP) im WCLL Primary Heat Transfer System (PHTS) und Divertor PHTS,
- Abwasser von Kühl-Hilfssystemen wie Chemikalien- und Volumenkontrollsystem, Komponenten-Kühlwassersystem, und Kaltwassersystem,
- Schmierstoffen,
- flüssigem Sekundärabfall nach chemischer Dekontaminierung.

Gasförmige Abfälle stammen z. B. möglicherweise aus:

- Tritium, HT, HTO,
- Mit Tritium kontaminiertes HCPB und PHTS,
- Luftverschmutzung durch Staub,
- CO<sub>2</sub>, CO aus C-14 im Recycling-Prozess /KAN 25/,
- Isotopen N-16 und N-17 durch Neutronenaktivierung von Sauerstoff im Kühlwasser.

### **Tritium-kontaminierte Abfälle**

Tritium soll im Brutblanket erzeugt, in einer separaten Anlage gereinigt und extrahiert und als Brennstoff im Plasma verwendet werden. Mit einer *tritium breeding ratio* (TBR) von 1,05 in DEMO sollen etwa 320 g Tritium/Tag aus dem Blanket extrahiert werden.

Das Tritiuminventar in allen Systemblöcken des Brennstoffkreislaufs beträgt 1,788 kg für WCLL und 1,765 kg für HCPB /SCH 22/. Tritium hat eine hohe Mobilität und kontaminiert verschiedene Materialien. Dies erfordert besondere Handhabungs- und Entsorgungsverfahren. Detritierungssysteme sind Schlüsselemente für die Entfernung von Tritium. Technologien für die Detritierung der Atmosphäre, des Belüftungssystems und des Wassers sind erforderlich. Tritium muss aus den kontaminierten Stoffen zurückgewonnen werden, um als Brennstoff wiederverwendet werden zu können und die Stoffe besser handhabbar zu machen. Noch ist unklar, mit welcher Effizienz zukünftige Tritiumkontaminierte Stoffe detritiert werden können. Diese Tritiumrückgewinnungsrate kann einen großen Einfluss darauf haben, wieviel Wärme die Anlagenteile wie lange nach Abschaltung noch abgeben /KAN 25/. Davon hängt dann wiederum ab, ob sie als radioaktive Reststoffe recycelt oder als radioaktive Abfälle (in manchen Ländern oberflächennah) endgelagert werden.

Die *Materials Detritiation Facility* (MDF) der UKAEA hat Abfälle von JET verarbeitet und dabei wurden über 20 Mg Edelstahl, Inconel und Graphit/Kohlefaserverbundwerkstoffe zur Detritierung behandelt. Diese Anlage verwendet ein thermisches Desorptionsverfahren zur Entfernung des Tritiums /ROS 24/.

#### **5.4.2 Zwischen- und Endlagerung in Deutschland**

In Deutschland wird zusätzlich zu hoch- und schwach- und mittelradioaktiven Abfällen nach „bestrahlten Brennelementen und Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen“ und „radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung“ unterschieden /ESK 23/ und /ESK 21/. Letztere sind besonders für das Endlager „Schacht Konrad“ relevant. Dieses ist für ein einzulagerndes Volumen von 303.000 m<sup>3</sup> an schwach- und mittelradioaktiven Abfällen genehmigt. Eine der Bedingungen dort ist, dass die durch die Zerfallswärme verursachte Temperaturerhöhung des Wirtsgesteins im Mittel 3 K nicht überschreiten darf. Dies entspricht einer mittleren Wärmeleistung von 200 W/m<sup>3</sup> Abfall. Genauere Anforderungen für die Einlagerungsbedingungen für das Endlager Schacht Konrad sind in /BRE 15/ gegeben.

Bevor schwach- und mittelradioaktive Abfälle im Endlager Schacht Konrad eingelagert werden, werden sie an Landessammelstellen abgegeben und dort zwischengelagert. Nach § 9a Abs. 3 Satz 1 erster Halbsatz StrlSchG sind die Bundesländer verpflichtet, Landessammelstellen „für die Zwischenlagerung der in ihrem Gebiet angefallenen radioaktiven Abfälle“ einzurichten. Dabei können sie sich „zur Erfüllung ihrer Pflichten Dritter

bedienen“. Kosten oder Entgelte für die Benutzung der Landessammelstellen werden in § 21a und möglichen weiteren Verordnungen geregelt. Die Verordnung über Anforderungen und Verfahren zur Entsorgung radioaktiver Abfälle (Atomrechtliche Entsorgungsverordnung – AtEV) regelt genaueres zu Pflichten zur z. B. Erfassung, Behandlung, Verpackung und Ablieferung von radioaktiven Abfällen aus Anlagen, die nach §§ 5, 6, 7, 9 oder 9b AtG oder nach § 12 Absatz 1 Nr. 1-3 StrlSchG genehmigt sind.

Um angenommen zu werden, müssen die Abfälle die Annahmebedingungen einer Landessammelstelle erfüllen. Dort sind z. B. unter anderem maximal zulässige spezifische Aktivitäten für bestimmte Radionuklide, z. B. H-3, C-14 oder Co-60 in den Abfällen angegeben. Außerdem sind maximal zulässige Gesamtaktivitäten pro Volumen pro Abfallgebinde je nach Abfallsorte (z. B. fest/flüssig, brennbar/nicht brennbar, organisch/anorganisch) angegeben. Für das Land Bayern zum Beispiel sind Annahmebedingungen und Preise in /GRB 25/ und /GRB 26/ spezifiziert.

Bereits jetzt ist absehbar, dass das genehmigte Einlagervolumen im Endlager “Schacht Konrad” für alle in Deutschland anfallenden schwach- und mittelradioaktiven Abfälle nicht ausreichen wird und es solche gibt, die dort aus anderen Gründen nicht eingelagert werden können. Somit wird es ein weiteres Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle geben müssen /BMUKN 25/. Ein Endlager am gleichen Standort wie das Endlager für hochradioaktive Abfälle ist dabei laut Standortauswahlgesetz (StandAG) eine mögliche und zu untersuchende Option /BMUKN 25/.

In /ESK 21/ werden „Leitlinien für die Zwischenlagerung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung“ angegeben, also für schwach- und mittelradioaktive Abfälle. In der Leitlinie steht explizit, dass sich diese sowohl auf Abfälle, die zur Endlagerung vorgesehen sind, also auch auf solche, die später freigegeben werden sollen, bezieht und auf noch nicht im Voraus festgelegte Zeiträume der Zwischenlagerung. Die Leitlinien beziehen sich auf Einrichtungen zur Zwischenlagerung, die nach §§ 6, 7, oder 9 AtG oder § 12 Abs. 1 Nr. 3 StrlSchG genehmigt sind. Formuliert allgemeine Schutzziele sind jede unnötige Exposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt zu vermeiden sowie diese unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung des Einzelfalls so gering wie möglich zu halten, auch unterhalb der Grenzwerte. Konkret werden unter anderem als Schutzziele angegeben:

- sicherer Einschluss der radioaktiven Stoffe,

- Vermeidung unnötiger Exposition, Begrenzung und Kontrolle der Exposition des Betriebspersonals und der Bevölkerung,

sowie folgende abgeleitete Anforderungen:

- Abschirmung der ionisierenden Strahlung,
- betriebs- und instandhaltungsgerechte Auslegung und Ausführung der Einrichtungen,
- sicherheitsgerichtete Organisation und Durchführung des Betriebes,
- sichere Handhabung, sicherer Transport und sichere Lagerung der radioaktiven Stoffe,
- Auslegung gegen Störfälle
- und, sofern wegen des Freisetzungspotenzials erforderlich, Maßnahmen zur Begrenzung der Schadensauswirkungen von auslegungsüberschreitenden Ereignissen.

Ist zu erwarten, dass flüchtige radioaktive Stoffe wie Tritium oder C-14 aus Materialien austreten, so ist die daraus resultierende zu erwartende Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung nach § 99 und 100 StrlSchV zu ermitteln /ESK 21/.

#### **5.4.3 Zwischen- und Endlagerung in anderen Ländern**

##### **Frankreich**

In Frankreich müssen in Anlagen Zonen deklariert werden, in denen radioaktive Abfälle entstehen können. Jeglicher Abfall aus einer radioaktiven Abfallzone wird als radioaktiv angenommen und als solcher behandelt /FRA 24/, /GON 22/.

Die Klassifikation der radioaktiven Abfälle erfolgt dann anhand der Aktivitäten pro Masse sowie Halbwertszeiten. Zusätzlich müssen weitere Kriterien wie chemisch-physikalische Parameter des Abfalls oder chemische Toxizität in Betracht gezogen werden /FRA 22/.

Sind die Halbwertszeiten kleiner als 100 Tage, dann werden die Abfälle nach einer Abklinglagerung entsorgt. Sehr schwach aktive Abfälle mit weniger als 100 Bq/g werden oberflächennah endgelagert, unabhängig von ihren Halbwertszeiten.

Abfälle mit Aktivitäten bis zu etwa 1 GBq/g und Halbwertszeiten bis inklusive 31 Jahren werden ebenfalls oberflächennah endgelagert, hierfür stehen die Entsorgungsanlagen l'Aube und la Manche zur Verfügung. Die Entsorgung von Abfällen mit Halbwertszeiten von mehr als 31 Jahren und Aktivitäten bis etwa 1 MBq/g wird noch untersucht. Tiefengeologische Endlagerung ist nötig für Abfälle mit bis zu etwa 1 GBq/g und Halbwertszeiten von mehr als 31 Jahren sowie allen Abfällen mit Aktivitäten oberhalb von 1 GBq/g.

Für einige Radionuklide gibt es spezifische Grenzen, die in verschiedenen Veröffentlichungen zitiert werden. In Tab. 5.3 sind diese für Abfälle, die im Endlager l'Aube entsorgt werden sollen, angegeben.

**Tab. 5.3** Im Endlager l'Aube akzeptierte spezifische Aktivitäten in schwachradioaktiven Abfällen /ROS 24/

| Isotop | Spezifische Aktivität (Bq/kg) |
|--------|-------------------------------|
| H-3    | $< 2 \cdot 10^8$              |
| C-14   | $< 9,2 \cdot 10^7$            |
| Co-60  | $< 1,3 \cdot 10^{11}$         |
| Ni-59  | $< 1,1 \cdot 10^8$            |
| Ni-63  | $< 3,2 \cdot 10^9$            |
| Nb-94  | $< 1,2 \cdot 10^5$            |
| Mo-93  | $< 3,8 \cdot 10^7$            |

VLL-Abfälle werden zurzeit im *Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage* (Cires) einige Meter unter der Erde eingelagert. Dies ist mit einer Kapazität von 650.000 m<sup>3</sup> genehmigt. Eine Erhöhung auf ein endzulagerndes Volumen von über 900.000 m<sup>3</sup> wurde 2023 beantragt. Ende 2023 waren bereits 469.000 m<sup>3</sup> Abfälle eingelagert, was 72 % des ursprünglichen genehmigten Volumens entspricht /FRA 24/.

Mit dem Rückbau von ITER werden in Zukunft große Mengen VLL, kurzlebiger LL und IL sowie langlebiger IL-Abfälle anfallen. Zusätzlich werden große Mengen tritierter Abfälle entstehen /GON 22/, /FRA 24/.

Kurzlebige *low level* und *intermediate level* Abfälle werden aktuell im Centre de stockage de l'Aube (CSA) eingelagert. Dabei handelt es sich um ein oberflächennahes Endlager.

Sowohl für CIREs als auch für CSA werden bis zu maximal 0,25 mSv/a außerhalb der Anlage pro Person während der Betriebs- und Nachverschlussphase akzeptiert /FRA 24/.

## UK

Im Vereinigten Königreich gibt es drei Hauptkategorien von radioaktivem Abfall. Abgebrannte Brennstäbe zählen zurzeit nicht ins Abfallinventar, da sie als Reststoffe und nicht als Abfälle eingestuft werden.

Die Kategorien für radioaktiven Abfall in UK sind:

- *High-level waste (HLW)*: hierbei handelt es sich um Abfälle, deren Temperatur aufgrund der radioaktiven Zerfälle signifikant ansteigen könnte und diese mögliche Temperaturerhöhung bei Lagerung und Entsorgung beachtet werden muss. Die Grenze dafür liegt bei 2 kW/m<sup>3</sup>. In /KAN 25/ wird dies auf die Masse bezogen mit etwa  $1.8 \cdot 10^{-6}$  kW/kg angegeben. Abgebrannte Brennstäbe werden, wie oben erwähnt, nicht als Abfall eingestuft.
- *Intermediate-level waste (ILW)*: hierbei handelt es sich um Abfälle, deren Aktivität die Grenzen von LLW überschreiten, aber durch die radioaktiven Zerfälle keine signifikante Menge an Wärme erzeugt wird ( $< 2$  kW/m<sup>3</sup>) und die somit nicht gekühlt werden müssen.
- *Low-level waste (LLW)*: hier dürfen nicht mehr als 4 MBq/kg an Alpha-Aktivität oder 12 MBq/kg an (Beta+Gamma)-Aktivität im radioaktiven Abfall enthalten sein.

Zusätzlich gibt es die Kategorie *higher activity waste*. Hierunter fallen alle Abfälle, die nicht im *low-level waste repository* entsorgt werden können. Somit enthält diese Kategorie aktuell alles HLW, alles ILW und manches LLW.

Die frühere Kategorie *very low level waste* wird in gewöhnlichen Deponien entsorgt und ist inzwischen obsolet.

## USA

In den USA werden 5 Kategorien von Abfällen unterschieden /DOE 21/:

- High-level radioactive waste (HLW)
- Spent nuclear fuel (SNF)
- Transuranic Waste (TRU waste)

- Low-level radioactive waste (LLW)
- By-product material

Für LLW gibt es wiederum 4 Unterkategorien: *Class A, B, C* und *greater than class C (GTCC)*. Diese unterscheiden sich durch die Konzentration der zulässigen nuklidspezifischen Aktivität pro Volumen. Dabei wird nach kurz- (H-3, Co-60, Ni-63, Sr-90 und Cs-137) und langlebigen (C-14, Ni-59, Nb-94, Tc-99, I-129, Pu-241, Cm-242) Radionukliden unterschieden. Da die Grenzen volumen- statt massenspezifisch sind, ist ein direkter Vergleich mit den Grenzen im französischen Regelwerk schwierig.

Die Abfälle werden größtenteils nach Herkunft und Ausschluss zugeordnet. So ist *HLW* definiert als hochradioaktives Material, das aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennstäben resultiert oder andere hochradioaktive Materialien, die dauerhaft isoliert werden müssen.

*TRU* Abfälle haben mehr als 3,7 kBq/g an Alpha-Aktivität aus transuranischen Isotopen mit Halbwertszeiten von mehr als 20 Jahren, die kein *HLW* sind.

*LLW* ist weder *HLW*, noch *SNF*, noch *TRU* oder *byproduct material* oder *NORM*. *Class A, B* und *C* Abfälle werden oberflächennah endgelagert. *GTCC* Abfälle sollen nach jetziger Planung tiefegeologisch endgelagert werden.

In einer Neuerung des Atomic Energy Act aus dem Jahr 2024 wird die Definition von *byproduct material* erweitert:

„The term “byproduct material” means—

(B) any material that—

(i) has been made radioactive by use of a particle accelerator, including by use of a fusion machine;”

Somit sind radioaktive Stoffe aus Fusionsanlagen als *byproduct material* definiert. Nach 10 CFR Part 20 können *byproduct materials* wie LLW oberflächennah entsorgt werden, auch wenn sie nicht als solcher definiert sind. Akzeptanzkriterien in Aktivität/Volumen für verschiedene Radionuklide sind in 10 CFR Part 61 spezifiziert.

Im Entwurf /NRC 24/ ist Abklinglagerung nur für Abfälle mit Halbwertszeiten bis einschließlich 120 Tage vorgesehen. Dort sind außerdem verschiedene Wege beschrieben, wie mit flüssigen und festen radioaktiven Abfällen umgegangen werden soll.

## **5.5            Sicherung**

Das Vorhandensein hoher Aktivitäten radioaktiver Stoffe in Fusionsanlagen sowie der Betrieb von Fusionsanlagen mit sicherheits- und strahlenschutzrelevanten Systemen erfordert grundsätzlich Sicherungsmaßnahmen gegen Störmaßnahmen und sonstige Eingriffe Dritter (SEWD). Die Staffelung der Maßnahmen richtet sich dabei nach dem Gefährdungspotential. Dies sind Maßnahmen des konventionellen Strahlenschutzes sowie oberhalb bestimmter Schwellen entsprechender (nicht öffentlicher) SEWD-Richtlinien.

DIN 25422:2026-04 regelt den Diebstahlschutz in Abhängigkeit vom Verhältnis der Aktivität der Radionuklide, mit denen umgegangen wird, zu den Aktivitäten hochradioaktiver Quellen (HRQ) nach Anlage 4, Tabelle 1, Spalte 4 StrlSchV. Ab einem Verhältnis  $\geq 1$  sind die Anforderungen nicht mehr in der DIN sondern in SEWD-Richtlinien geregelt. Mögliche zusammenwirkende radioaktive Stoffe sind dabei mit der Summenformel zu berücksichtigen.

Beispielsweise beträgt der HRQ-Wert für Tritium  $2 \cdot 10^{15}$  Bq (2000 TBq). Dies entspricht etwa 5,6 g Tritium. Für aktivierte Strukturmaterialien – in der Regel metallische Produkte – liegen typische HRQ-Werte etwa für Wolfram- und Tantal-Nuklide in einem weiten Bereich von 0,06 bis 100 TBq. Zum Vergleich beträgt der HRQ-Wert von Co-60 0,03 TBq und der von Cs-137 0,1 TBq.

## **5.6            Nichtverbreitung**

Die Fusion enthält ein begrenztes Potential zur Verbreitung von Kernwaffen. Drei Aspekte der Fusionstechnologie könnten für Atomwaffenprogramme verwendet werden: Fusion als starke Neutronenquelle, die Verwendung und Produktion von Tritium, sowie der mögliche physikalisch-technische Erkenntnisgewinn aus Laserfusionprozessen.

### **5.6.1          Fusion als hochenergetische Neutronenquelle**

Die Fusion von D-T produziert Neutronen mit einer kinetischen Energie von 14,1 MeV. Diese Neutronen der Fusionsreaktion können aus fertilen Elementen wie Uran und Thorium spezielles, für den Bau von Atomwaffen geeignetes, spaltbares Material (special

fissile material) wie Pu-239 und U-233 über eine Neutroneneinfangreaktion produzieren.<sup>9</sup>

Für die technische Umsetzung im Sinne einer gezielten Erzeugung von Spaltmaterial für Kernwaffen wurden in der Literatur drei Varianten exemplarisch diskutiert. Zum einen ist es denkbar, hinter dem Brutblanket eine zweite Wand einzubauen, welche U-238 enthält /FAG 08/. Zum anderen wäre es möglich, das Uran in sogenannten TRISO Partikeln<sup>10</sup> in das Kühlmittel zu geben /GLA 12/. Auch eine Beimischung in ein flüssiges Kühlmittel wie Blei oder eine Salzschnmelze ist denkbar.

Simulationen haben gezeigt, dass ein Fusionsreaktor im Gigawatt-Bereich mittels TRISO-Partikel in etwa 500-1000 kg an Plutonium pro Jahr herstellen könnte /GLA 12/. Die IAEA definiert als eine signifikante Menge von Plutonium 8 kg /IAEA 22/, so dass dies ausreichen würde, um etwa 60-130 Kernwaffen herzustellen. Eine Studie zu Plutoniumbrüten in einer zweiten Wand nimmt an, dass in etwa 10 kg Plutonium pro Jahr aus einem 3 GW Fusionsreaktor produziert werden könnten /FAG 08/, was in etwa für eine Atomwaffe ausreichen würde. Simulationen einer Beimischung in das Kühlmittel ergaben Produktionsmengen von 10 – 1000 kg Plutonium pro Jahr für ein Kraftwerk der Gigawatt Klasse /ENG 16/.

Durch das sehr harte Neutronenspektrum in einem Fusionsreaktor wird die Entstehung höherer Plutoniumisotope unterdrückt. Das Plutonium enthält daher sehr hohe Anteile an Pu-239 (>95%) /ENG 16/, /KAL 04/. In den militärischen Kernwaffenprogrammen kommt typischerweise Plutonium mit einem Pu-239 Anteil >93% zum Einsatz.

Da in Fusionsreaktoren Neutronen im Fusionsplasma entstehen ist keine kritische Anordnung notwendig, um Neutronen zu erzeugen. Dadurch sinkt der minimale Bedarf an Ausgangsmaterial (source material)<sup>11</sup> gegenüber kritischen Anordnungen deutlich, um eine signifikante Menge an spaltbarem Material zu erzeugen /ENG 16/. In den umfassenden Safeguardsabkommen (insb. INFCIRC/153) der IAEA können daher Mengen

---

<sup>9</sup> Die IAEA definiert den Begriff „special fissile material“ in ihren Statuten in Artikel XX. Darunter fallen vor allem Pu-239 und U-233.

<sup>10</sup> TRISO Partikel sind Teilchen mit einem Durchmesser von etwa einem Millimeter, in welchem Uran oder Thorium von mehreren Schichten Graphit umgeben ist.

<sup>11</sup> Das umfasst nach Artikel XX IAEA Statut insbesondere natürliches oder angereichertes Uran.

unterhalb von 10 t Natururan oder äquivalente effektive Mengen an Uran-235 aus Safeguards ausgenommen werden.

Einen Einfluss auf das Proliferationsrisiko, das von Fusionsanlagen ausgeht, haben folgende Punkte:

- Sowohl ein Fusionskraftwerk als auch der gesamte Fusionskreislauf verwendet im Regelbetrieb kein spaltbares Material<sup>12</sup>.
- Damit ein Fusionsreaktor spaltbares Material für Kernwaffen herstellen kann, sind Änderungen an einem Design notwendig, etwa aufgrund des Platzbedarfs oder durch zusätzlichen Wärmeeintrag.
- Ein Fusionsreaktor kann aufgrund seiner Größe und des Energiebedarfs zum Start von Fusionsreaktionen nur schwer im Verborgenen gebaut werden.
- Durch die Produktion spaltbaren Materials kann die Tritiumbrutrate beeinflusst werden.
- Das bestrahlte spaltbare Material muss aus dem Reaktor entfernt und zur Plutoniumgewinnung wieder aufbereitet werden.

Im Rahmen des nuklearen Nichtverbreitungsregimes ergeben sich damit als wesentliche zukünftige Aufgaben, die Abwesenheit von Brutmaterial zur Erzeugung von Spaltmaterialien in der Anlage im Rahmen des Safeguardsregimes zu verifizieren. Dazu können eine Reihe vorhandener technischer Überwachungsmaßnahmen der IAEA eingesetzt werden. Neben einer Überprüfung der Anlagenauslegung kann dazu insbesondere eine Überwachung der Verbringung von Materialien in und aus der Anlage dienen. Weiterhin könnte eine Neutronenbilanzierung dabei helfen, eine Produktion von signifikanten Mengen spaltbarer Materialien aufzudecken. Allerdings bestehen derzeit Unklarheiten, inwieweit das Nichtverbreitungsregime adäquate Antworten auf das Proliferationsrisiko der Fusion bereithält und inwieweit bisherige Safeguardstechnologien für die Anwendung auf Fusionsanlagen geeignet und ausreichend sind /ENG 16/, /SAU 26/.

---

<sup>12</sup> Es gibt auch Fusionskonzepte, die den Einsatz von Uran im Brennstoffkreislauf eines Fusionskraftwerks vorsehen, solche werden jedoch von den in Deutschland aktiven Unternehmen nicht verfolgt. In einem solchen Fall wäre das IAEA Safeguards Regime wohl vollumfänglich anzuwenden.

### 5.6.2 Tritium und Tritiumbrüten

Tritium bildet einen essentiellen Bestandteil in modernen Atomwaffenarsenalen. Während alle Atomwaffen zunächst auf spaltbarem Material (vor allem U-235 oder Pu-239) basieren, können durch Fusionsprozesse erzeugte Neutronen den Anteil an spaltbarem Material, der zur Explosion beiträgt, erhöhen. Bei diesem sogenannten Boosting wird ein Deuterium-Tritium-Gemisch mit wenigen Gramm Tritium im Inneren einer Anordnung aus Spaltmaterial mitkomprimiert. Im Ablauf der Kernspaltung wird der Fusionsprozess im Deuterium-Tritium-Gemisch ausgelöst. Die dabei zu einem frühen Zeitpunkt freigesetzten Neutronen führen dann durch die Kettenreaktion zu einer höheren Ausbeute der Kernspaltung im umgebenden Spaltmaterial und ermöglichen dadurch eine Verringerung des benötigten Spaltmaterials und eine Verkleinerung der Waffe /HEC 12/.

Auch Lithium als Ausgangsmaterial zum Tritiumbrüten ist relevant. In sogenannten Wasserstoffbomben wird die Energie einer Kernspaltwaffe dazu genutzt, in einem Sekundärteil, der überwiegend aus einem Lithium-Deuterium-Gemisch besteht, einen Kernfusionsprozess zu starten. Dieser kann die durch reine Kernspaltung freigesetzte Energie nochmals erheblich erhöhen. Dadurch ist auch die Verwendung von angereichertem Lithium – die Li-6 Anreicherung ist auch für einige Fusionskonzepte zur Tritiumproduktion vorgesehen - relevant für den Bau von Kernwaffen und angereichertes Li-6 steht schon heute unter Exportkontrolle.

Die militärische Tritiumproduktion beläuft sich auf etwa 5 kg pro Jahr /SAU 26/, die zivile Produktion aus Schwerwasser-Reaktoren – vor allem sogenannte CANDU Reaktoren - auf etwa 2 kg pro Jahr (/PEA 18/). Nimmt man als obere Grenze an, dass in allen 12.000 Atomsprengköpfen je drei Gramm Tritium enthalten sind /KAL 95/, so sind maximal 36 kg in Atomwaffensprengköpfen vorhanden. Bei einer Halbwertszeit von Tritium von etwa 12 Jahren besteht somit ein jährlicher Bedarf von etwa 2 kg für die bestehenden Waffen.

Fusionsanlagen werden die jährliche Produktion von Tritium massiv erhöhen. Als Beispiel: EU DEMO wird in etwa 110-120 kg Tritium pro Jahr produzieren und dabei in etwa 100 kg Tritium selbst konsumieren /FED 19/. Stellaris, das von Proxima Fusion geplante Kraftwerk, soll pro Tag etwa 400 g Tritium verbrauchen, somit also ebenfalls in der Größenordnung von 100 kg Tritium pro Jahr erbrüten /LIO 25/. Während Fusionsreaktoren das meiste des erbrüteten Tritiums zwar selbst verbrauchen, so sollen sie aber einen Überschuss von 5-20 % produzieren /PER 16/, /LIO 25/, insbesondere um künftige Fusionskraftwerke mit dem für den Start erforderlichen Brennstoff versorgen zu können.

Aufgrund der erhöhten Verfügbarkeit von Tritium, der zu erwartenden Erkenntnisse im Umgang mit Tritium sowie wissenschaftlicher Durchbrüche bei der Tritiumbruttechnologie aus Li-6 besteht folglich ein Potential, dieses Tritium für militärische Zwecke einzusetzen.

Gegenwärtig ist Tritium nicht Bestandteil des Safeguards-Überwachungssystems der IAEA. Zukünftig stellt sich damit die Frage, inwieweit das existierende Überwachungssystem der IAEA auch für eine Überwachung des in zivilen Anlagen erzeugten Tritiums Anwendung finden soll /KAL 04/, /SAU 26/. Darüber hinaus ergeben sich Fragen im Zusammenhang mit der Kontrolle von Dual-Use-Technologien (z. B. zur Anreicherung von Lithium).

### **5.6.3 Inertialfusion und Kernwaffenentwicklung**

Die Weiterentwicklung von Kernwaffen in fortgeschrittenen Kernwaffenstaaten erfolgt derzeit in milliardenschweren Programmen zur Simulation der wesentlichen Eigenschaften von Kernwaffen mit Hilfe von leistungsstarken Supercomputerarchitekturen. Die Virtualisierung wird unterstützt durch umfangreiche Experimentaleinrichtungen zur Gewinnung relevanter Daten. Im Kern geht es dabei um ein besseres Verständnis der ablaufenden Prozesse sowie der Gewinnung von experimentellen Daten zum Zustand von Materie unter extrem hohen Drücken und Temperaturen.

Das Gefährdungspotential in Bezug auf die Nichtverbreitung ergibt sich daher im Prinzip für alle Inertialfusionsentwicklungen aus einem möglichen Erkenntnisgewinn aus diesen Prozessen und der Möglichkeit diese zu simulieren /NRC 13/. Hierbei ist aber zu beachten, dass allein diese Erkenntnisse nicht genügen, eine Atomwaffe zu bauen. Sie können allerdings bestehende oder in der Entstehung befindliche Atomwaffenprogramme potentiell unterstützen.

Aktuell existieren zwei große Laserfusionsanlagen, die National Ignition Facility (NIF), als Teil des Lawrence Livermore National Laboratories (LLNL) in den USA, sowie der Laser Mégajoule (LMJ) in Frankreich. Beide Anlagen wurden in erster Linie für militärische Zwecke errichtet. In Folge der Bestrebungen, keine Atomwaffentests mehr durchzuführen, dienen diese Laserfusionsanlagen dazu, Simulationscodes zu entwickeln und zu testen. Diese Anlagen verwenden dabei die Variante der *indirect-drive* Fusion. Hierbei werden die Laser nicht unmittelbar auf die Brennstoffkapsel geschossen, sondern zunächst in ein Target, das einen Hohlraum bildet, an dessen Oberfläche die

Laserstrahlung in ein Strahlungsbad von weicher Röntgenstrahlung umgewandelt wird. Die Oberfläche der Brennstoffkapsel, die sich in diesem Strahlungsbad befindet, „ablatiert“, so dass es zu einer innengerichteten Reaktionskraft kommt, die die mit DT-Brennstoff gefüllte Kapsel komprimiert und zündet. Diese Energieübertragung über Röntgenstrahlung ist ebenfalls von Relevanz für die Prozesse, die innerhalb von Atomwaffen stattfinden /LIN 95/, /DOE 95/.

Andere Ansätze wie die *direct drive* Laserfusion, die insbesondere deutsche Laserfusions-Startups verwenden, sind nach der Studie der US National Academies /NRC 13/ physikalisch deutlich weiter weg von den Bedingungen in Kernwaffen („much more remote“). Hierbei werden die Laser unmittelbar auf die Brennstoffkapsel gezielt. Entsprechend wird das Risiko zum Erkenntnisgewinn als geringer eingeschätzt.

Die Autoren von /NRC 13/ gehen davon aus, dass die Sonderstellung des *indirect drive* als besonders proliferationsrelevant in Zukunft – mit der zunehmenden öffentlichen Verfügbarkeit von Codes, Rechenleistung und Wissen über Plasma – abnehmen wird und dann kaum mehr Unterschiede bezüglich der Proliferationsrelevanz zwischen den Ansätzen bestehen. Der Fokus der Proliferationsrelevanz verschiebt sich dann - nach Einschätzung der Autoren - von der Targetphysik hin zur Nutzung klassifizierter Codes und zu Datensätzen, die für eine Kalibrierung der Codes für die Simulation von Kernwaffen notwendig wären /NRC 13/.



## 6 Simulationscodes

Die Bewertung des radiologischen Gefährdungspotentials zukünftiger Fusionskraftwerke erfordert eine umfassende Analyse des Radionuklidinventars und der Freisetzungsmöglichkeiten dieser Stoffe unter normalen Betriebsbedingungen („bestimmungsgemäßer Betrieb“) sowie im Stör- und Unfall. Dies setzt die Anwendung geeigneter, validierter Simulationscodes voraus, die verschiedene physikalische und chemische Phänomene abdecken – von der Neutronenaktivierung über Staub- und Korrosionsproduktbildung bis hin zur Berechnung von Dosisgrößen.

Die spezifische Auswahl der für die Durchführung einer Sicherheitsanalyse für eine bestimmte Anlage notwendigen Simulationscodes kann erst erfolgen, wenn das Anlagen-design ausreichend detailliert vorliegt und durch entsprechende Analysen (siehe Abschnitt 5.3.1) die PIE und die daraus resultierenden Stör- bzw. Unfallabläufe bestimmt worden sind. Die hier aufgeführten Simulationscodes stehen exemplarisch für solche Codes und wurden im Wesentlichen für die Arbeiten im Rahmen von ITER und/oder EU DEMO verwendet und gegebenenfalls dafür neu- bzw. weiterentwickelt.

Für Analysen von Stör- und Unfallabläufen im Rahmen von Sicherheitsanalysen werden typischerweise sogenannte Integralcodes verwendet, die aus der Kerntechnik (Fission) stammen und letztlich neben der Bestimmung von Parametern wie Druck- und Temperaturverhalten der Anlage, die Radionuklidfreisetzung in die Anlagenumgebung ermitteln sollen. Einige bekannte Vertreter sind der US-amerikanische Code MELCOR, der französische ASTEC und der deutsche Code AC<sup>2</sup>. Solche Computerprogramme sind in der Lage, die Thermohydraulik des Kühlkreislaufes und des Containments zu simulieren, sowie die Radionuklidfreisetzung und deren Transport inklusive der Ablagerungsmechanismen etc. Diese Phänomene sind komplex und physikalisch gekoppelt, so dass eine numerische Behandlung unabdingbar ist. Die oben genannten Integralcodes verstehen sich als sog. „lumped parameter“ Codes, wobei extensive Größen wie das Volumen, die Wassermenge, Radionuklidmenge etc. in Raumpunkten eines Rechengitters vereinigt sind, verbunden mit den intensiven Größen wie der Temperatur. Dieser Ansatz erfordert, dass die Anlage entsprechend modelliert wird. Somit besteht eine Unterscheidung zwischen den Rechenverfahren und Rechenmodellen des Codes zur Modellierung des physikalisch-chemischen Verhaltens und den Eingabedaten als Modell der Anlage, welches typischerweise der Anwender des Codes erstellt.

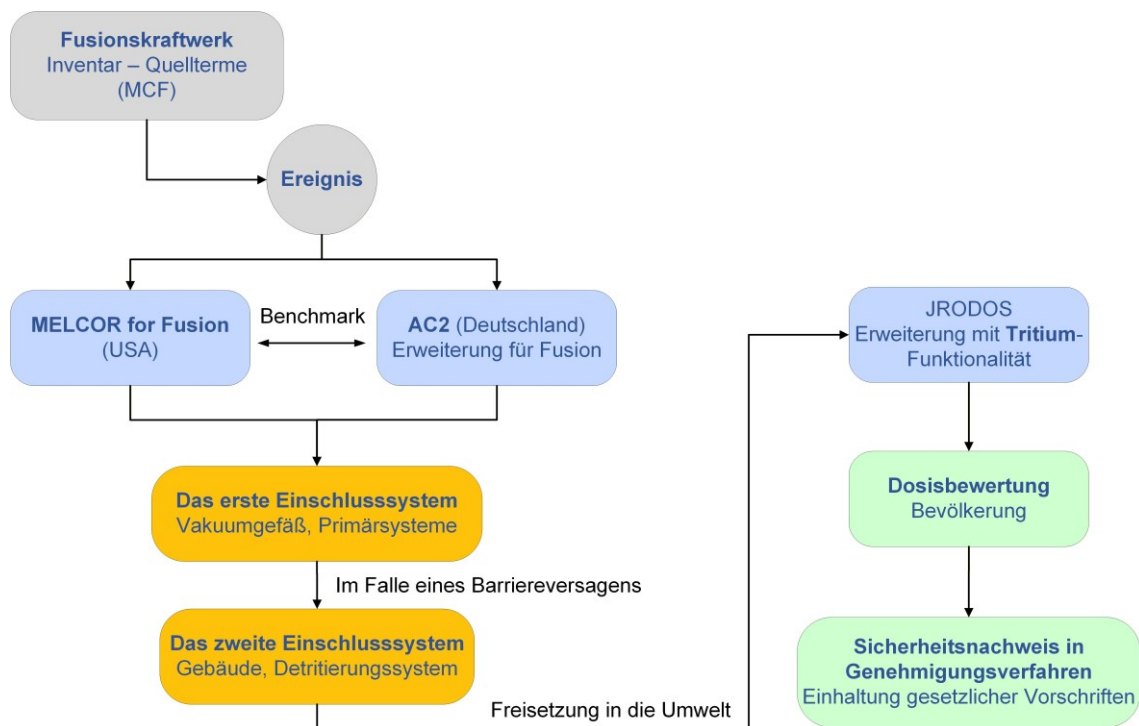
Diese Programme sind für die Anlagen der Kerntechnik durchaus in der Lage, die meisten Phänomene mechanistisch oder parametrisch abzubilden, sowohl im Stör- und Unfall als auch im Leistungsbetrieb.

In Hinsicht auf die Fusion sind die Modelle der ursprünglichen Codes nicht ausreichend, so fehlen typischerweise die chemischen Reaktionen mit den Blanketmaterialien. Auch für die Fusion relevante Arbeitsfluide sind in den Codes mitunter nicht vorhanden. Nichtsdestotrotz sind Codes wie MELCOR oder ASTEC in der Fusionsgemeinschaft verbreitet. Dies bedingt teils eine begrenzte Abdeckung von Phänomenen, teils sind fusionsspezifische Modelle nachgerüstet und die Codes entsprechend validiert worden, insbesondere im Falle von MELCOR.

Andere relevante Größen wie die Menge an aktivierten Stäuben werden als Randbedingung angegeben, wobei die entsprechenden Werte aus Analysen mit spezialisierten Codes wie solche, die die Erosion im Betrieb berechnen können oder die die Aktivierung im Neutronenfeld ermitteln. Eine Implementierung in den Integralcode würde sehr wahrscheinlich zu einem unpraktikablen Rechenzeitbedarf führen.

Der Ermittlung der Radionuklidfreisetzung (Quellterm) ist die Berechnung der Strahldosis nachgelagert durchzuführen, welche letztlich die für die Gefährdung und damit für die Regulatorik wichtigste Größe darstellt. Wie schon bei der Bestimmung der Randbedingung der Simulation mit den Integralcodes, werden auch hierfür spezialisierte Codes verwendet. Um einen Eindruck eines integralen Analyseablaufs zu erhalten, betrachte man Abb. 6.2, welche den End-to-End-Workflow für eine Unfallanalyse im Kontext eines Fusionskraftwerks zeigt. Zu Beginn werden die inventarisierten Quellterme im System bestimmt (z. B. Tritium, Stäube, ACPs). Zusätzlich werden Mobilisierbarkeit und Freisetzungsfractionen festgelegt, sowie ein Unfallszenario definiert. Dies umfasst die Bestimmung einleitender Ereignisse, der Systemverfügbarkeiten und sonstige relevante Randbedingungen. Bei Unfallanalyse für den EU DEMO in *EUROfusion* ist der System- oder Integralcode MELCOR 1.8.6 for fusion als qualifizierter Code gewählt worden (FED\_Caruso\_2022). Das Ereignis wird mit MELCOR simuliert, um die thermohydraulischen Abläufe, Stofftransport und Freisetzungsdynamiken innerhalb der Anlage zu simulieren. Falls die Wirksamkeit der Barrieren nicht vollständig gewährleistet ist, kann es zu Freisetzungen von Radionukliden in die Anlagenumgebung kommen. Eine solche Freisetzung mit den Informationen hinsichtlich des Radionuklidvektors, der entsprechenden Mengen in Abhängigkeit von der Zeit, ist der bereits zuvor genannte Quellterm. Nach dessen Bestimmung wird der Code JRODOS vorgesehen, um die radiologischen

Auswirkungen auf Mensch und Umwelt in Form von Strahlendosen zu berechnen. JRODOS steht seit 2021 mit einer Erweiterung in Hinsicht auf die Tritium-Funktionalität bei EUROfusion zur Verfügung. Die Dosiswerte dienen zur Sicherheitsbewertung und regulatorischen Nachweisführung (z. B. zum Sicherheitsnachweis in Genehmigungsverfahren). Aktuell sind bei der EUROfusion für die Dosisabschätzungen die Computerprogramme UFOTRI zur Bewertung der Folgen von unbeabsichtigten Tritiumfreisetzungen und COSYMA für die Aktivierungsprodukte (W-Staub, ACP) vorhanden /CAR 22/, /JIN 24/. Es ist angedacht, dass JRODOS, nach der Übernahme der aktualisierter Tritium-Funktionalität von UFOTRI, die beiden Codes UFOTRI und COSYMA ersetzt.



**Abb. 6.1** Sicherheitsanalyse – End-to-End Workflow

MELCOR ist ein ursprünglich in den USA entwickelter integraler Unfallanalyse-Code. Es wird international genutzt, so auch in Europa. Der vollständige Source Code ist jedoch nicht frei verfügbar, sondern unterliegt US-Exportkontrollen und Lizenzbedingungen. Es bestehen Einschränkungen hinsichtlich Transparenz, Anpassbarkeit und regulatorischer Unabhängigkeit in Europa. Für sicherheitsrelevante Anwendungen wird jedoch oft ein hoher Anspruch an Nachvollziehbarkeit gestellt. Daher verfolgen europäische Länder teilweise eigene Strategien. So wird beispielsweise in Frankreich von ASNR ASTEC an die Spezifika der Fusion angepasst, um von externen (US) Tools unabhängig zu sein,

und die Genehmigungspraxis durch transparente Modelle zu unterstützen. In Deutschland selbst findet für Anwendung auf ein Fusionskraftwerk derzeit keine vollständige Eigenentwicklung eines MELCOR-Äquivalents statt. Das Programmpaket AC<sup>2</sup> der GRS kann für kerntechnischen Anlagen prinzipiell gleichwertig zu MELCOR und ASTEC eingesetzt werden. Ergebnisse der Vergleichsanalyse zu den genannten Codes zeigen jedoch auf, dass für Anwendungen im Fusionskontext noch spezifischer Erweiterungsbedarf besteht (z. B. in Bezug auf Thermohydraulik, Brennstoffkreislauf, Quellterme, materialbedingte Aktivierung, usw.). Daher sind gezielte Erweiterungen erforderlich, um die spezifischen Phänomene der Fusion adäquat abzubilden. Diese Erweiterungen sind dann gegen für Fusionsanwendungen repräsentativen Experimenten zu validieren.

Darüber hinaus unterstützt die Weiterentwicklung eines national verfügbaren Codes die regulatorischen Anforderungen an Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Unabhängigkeit in Sicherheitsanalysen. Dies ist insbesondere in Genehmigungsverfahren von Bedeutung. Vor diesem Hintergrund ist die Weiterentwicklung von AC<sup>2</sup> eine wichtige Grundlage, um in Deutschland eine eigenständige, nachvollziehbare und regulatorisch robuste Unfallanalyse für Fusionskraftwerk sicherzustellen.

Die GRS verfügt über das Programmpaket AC<sup>2</sup>, bestehend aus den Programmen ATHLET (in erster Linie Thermohydraulik im Reaktorkühlkreislauf), ATHLET-CD (Erweiterung um die Kernzerstörung) und COCOSYS (Phänomene im Sicherheitsbehälter), die für die Simulation und Bewertung des Verhaltens von Kernkraftwerken während des bestimmungsgemäßen Betriebs, anomalen Betriebs und bei Stör- und Unfällen entwickelt und validiert wurden. Diese Programme beinhalten eine Vielzahl an Modellen für die Abbildung spezifischer physikalisch-chemischer Phänomene. So existiert in COCOSYS ein dediziertes Modul, welches das Verhalten (Transport, Ablagerung, Größenwachstum etc.) von Aerosolen abbildet, jedoch unter Bedingungen (hoher Druck [ $>1$  bar], hoher Anteil von Wasserdampf etc.), die typisch für einen Stör- bzw. Unfall einer kerntechnischen Anlage (Fission) sind. Eine Übertragung auf die Fusion ist in Hinsicht auf viele Aspekte nur für Stör- und Unfallanalysen möglich und ist an Experimenten zu validieren. Für andere, fusionsspezifische Phänomene sind teils neue Module zu entwickeln, so z. B. für den Tritiumtransport, für andere wie die Produktion von Staub und dessen Verhalten im Leistungsbetrieb ist keine direkte Integration in den Integralcode AC<sup>2</sup> vorgesehen. Hierfür sind Vorrechnungen wie die zur Bestimmung der Menge an Staub, deren Größenverteilung und die Adhäsionskraft auf die Oberflächen durchzuführen und dem Integralcode als Randbedingung zu übergeben. In einem Stör- bzw. Unfall können diese

dann von Modulen im Integralcode weiterverwendet werden, wie der Aersolkernel im Falle der Stäube.

Grundsätzlich birgt die Weiterentwicklung der Codekette AC<sup>2</sup> den Vorteil ggü. der ausschließlichen Verwendung der oben genannten Codes, dass Deutschland selbst über dessen Entwicklungen entschied und somit ein unabhängiger Code für die sicherheitstechnische Bewertung der Genehmigungsbehörde zur Verfügung stünde.

Im Folgenden wird die Codelandschaft kurz dargestellt, die als Ergänzung zu den Eigenschaften des Integralcodes zu bewerten ist. Ferner sollen die Felder adressiert werden, auf denen eine Weiterentwicklung des GRS-eigenen Integralcodes AC<sup>2</sup> vorgesehen ist.

Weiterhin ist hierbei die Einschränkung zu nennen, dass sich die Ausführungen in erster Linie auf die Reaktorkonzepte im Bereich MCF beziehen, da in der wissenschaftlichen Literatur bis auf wenige Ausnahmen über Sicherheitsanalysen nur für diesen Anlagentyp berichtet wird. Es ist anzunehmen, dass einerseits sowohl teilweise die Technologie als auch die entsprechenden Computerprogramme auch auf die ICF anwendbar bzw. übertragbar sind. Für einzelne Anwendungen wurden vorhandene Systemcodes für Analysen von ICF-Anlagenkonzepten verwendet /REY 16/. Die Entwicklungen in der MCF sind daher weiterhin zu verfolgen insbesondere in Hinsicht auf technologische Aspekte wie die Reaktorkammer, die erste Wand und das dahinter liegende Brutblanket usw. Anschließend kann bewertet werden, inwieweit die Codelandschaft übertragbar ist bzw. erweitert werden muss.

## **6.1 Kernphysikalische Prozesse: Aktivierung, Neutronentransport und Tritiumbrüten**

Das Radionuklidinventar besteht aus dem Fusionsbrennstoff Tritium und aus Radionukliden, die durch Neutroneneinfangreaktionen in Strukturmaterialien entstehen. Um die entsprechenden Mengen der neugebildeten Radionuklide zu quantifizieren, werden spezialisierte Codes wie ORIGEN, MCNP /KUL 22/, OpenMC /ROM 15/, Serpent /LEP 15/, FISPACT /UKAEA 21/ oder VENTINA /BEH 23/ für verschiedene Teilaufgaben eingesetzt. VENTINA wird von der GRS entwickelt mit anderen Codes wie MCNP gekoppelt, um Abbrand und Aktivierung von Kernbrennstoffen in einem integrierten Prozess zu berechnen. Diese Codes benötigen detaillierte Anlagendaten (Geometrie, Materialzusammensetzung etc.) und liefern den Nuklidvektor als Eingabedaten für die Stör- und

Unfallanalyse. Für Fusionsanwendung ist eine Integration dieser Ergebnisse in AC<sup>2</sup> notwendig, wobei die Codes selbst ihre Simulationen unabhängig von AC<sup>2</sup> durchführen können.

## **6.2 Tritiumverhalten**

Aufgrund der Relevanz der Tritiumproblematik zur Bestimmung des radioaktiven Inventars sind Programme entwickelt worden, die den Tritiumtransport inklusive dessen Permeation berechnen können. So z. B. ist der Code TMAP (Tritium Migration Analysis Program) /DOE 08/, /SIM 25/ in den späten 1980er Jahren von Brad Meryll und James Jones am INL (Idaho National Engineering and Environmental Laboratory) und bis heute zur Version TMAP-8 weiterentwickelt worden. Daneben existieren ebenfalls europäische Codes für dieses Feld (MHIMS, Migration of Hydrogen Isotopes in Materials; FESTIM, Finite Element Simulation of Tritium In Materials) /SHI 24/, /GRI 21/. Der eindimensionale Code MHIMS berechnet dabei die Einlagerung in die Schichten direkt unter die Oberfläche der PFCs in einer Tiefe im nm bzw.  $\mu\text{m}$ , wo sich eine supersaturierte Schicht an Wasserstoffisotopen in dieser Implantationszone ausbilden kann. FESTIM hingegen berechnet die Migration durch den Rest der Komponenten in zwei Dimensionen. Durch diese Aufteilung der Bereiche wird ein zu großer numerischer Aufwand vermieden. Auch werden Gitterfehler berücksichtigt, die als Fallen für Wasserstoffisotope fungieren. Ein HTO-Transportmodell ist hierbei jedoch nicht gegeben, dies wiederum leistet in einfacher Form die Fusionsversion von MELCOR /MER 07/.

## **6.3 Staub- und Korrosionsproduktbildung**

Aktiviert Materialien können als Staub (z. B. durch Sputtering, Aufschlagen von oberflächennahen Blasen oder thermische Erosion) mobilisiert werden. Codes wie WALLDYN /SCH 18/, DUSTTRACK, DTOKS /UCC 16/, ERO2.0 /ROM 19/, /BAU 25/ oder MIGRAINE /PAS 21/ simulieren teils die Erosion der ersten Wand bzw. den Transport von Stäuben im Vakuum. Für die Resuspension abgelagerter Stäube, die für eine Quelltermbestimmung relevant wäre, sind Ansätze wie das „rock-n-roll“-Modell erforderlich, die mit CFD-Simulationen gekoppelt und anhand von Experimenten validiert werden müssen. Für aktiviert Korrosionsprodukte (ACP) existieren spezialisierte Codes wie TRACT /KAR 07/, OSCAR-Fusion /CAR 24/ oder GETTHEM /LIS 23/ die Korrosionsraten, Transport und Ablagerung simulieren. Die Modelle für die Korrosion sind oft

semiempirisch und erfordern in Hinsicht auf die Flüssigmetallkühlung (z. B. PbLi) Anpassungen.

#### **6.4 Plasmainstabilitäten**

Instabilitäten wie Disruptionen, Runaway-Elektronen-Ereignisse oder Edge-Localized-Modes (ELMs) stellen sicherheitstechnische Risiken dar. Durch sie können hohe Energien auf die erste Wand übertragen werden, welche dadurch Schaden nehmen kann, so dass es zu einen Kühlmittelverlustszenario in das Vakuumgefäß kommt. Dieses wiederum kann zu einem Druckaufbau und letztlich zu einer Freisetzung führen. Der Code JOEREK /HOE 21/ist ein leistungsfähiger MHD-Code, der in der Lage ist, solche Phänomene zu simulieren. Die Ergebnisse (z. B. Energieflussdichte auf der Wand) können als Randbedingungen für AC<sup>2</sup> verwendet werden.

#### **6.5 Materialalterung**

Jedes Material verliert mit der Zeit seine ursprünglichen Eigenschaften durch gewisse Umwelteinflüsse. In der Fusion sind die Materialien innerhalb des Vakuumgefäßes äußerst harschen Bedingungen ausgesetzt. Dies führt z. B. zum Schwellen des Materials, zu Blasenbildung etc. Auch beeinflusst die Implantation von Stoffen aus dem Plasma und die Ablagerung von Verunreinigungen auf der ersten Wand die Erosion der entsprechenden plasmazugewandten Komponenten (siehe dort).

Die Materialalterung durch Schwellen und die Tritiumfreisetzung (z. B. in Beryllium) wird mit Programmen wie ANFIBE /SCA 95/ modelliert, das auf dem Code FUTURE basiert.

Zu den Codes, die das Kornwachstum von Materialien berechnen können, gehört MOOSE bzw. dessen *phase field* Modul, welches auch zur Analyse von Rissverhalten verwendet wird.

#### **6.6 Chemische Reaktionen und Freisetzung**

Reaktionen von Wolfram oder Beryllium mit Wasserdampf oder Sauerstoff können Wasserstoff freisetzen und zu Wasserstoffverbrennungen oder Staubexplosionen führen. AC<sup>2</sup> verfügt über Modelle für Wasserstoffverbrennung, nicht jedoch für die Reaktionen von Wolfram oder Beryllium. Diese sind zu ergänzen. Auch die Freisetzung von Tritium

und Aktivierungsprodukten aus Materialien ist relevant. Hierfür existieren spezialisierte Modelle wie FIRPEM (in ATHLET-CD gegeben) oder SOLIDUSS /RUI 22/, ein Code auf Basis eines Monte-Carlo Diffusionsmodells. Eine Erweiterung von FIPREM in AC<sup>2</sup> um Freisetzungsmodelle für Radionuklide aus für die Fusion relevanten Materialien und Arbeitsfluiden bei den für Fusionsanwendungen vorliegenden Randbedingungen ist zu untersuchen.

## **6.7            Ausbreitung und Strahlenexposition**

Auch die Strahlenexposition innerhalb und außerhalb der Anlage wird durch spezialisierte Rechenprogramme bestimmt. Für die Berechnung des Strahlenfelds innerhalb der Anlage kann beispielsweise ein von der GRS erstelltes, relativ einfaches Programm verwendet werden, das die Propagation von geladenen Teilchen durch Materie berechnet, dabei die Bremsstrahlungsemission, sowie die Gammaemission durch den Zerfall berücksichtigt. Für eine integrale Stör- und Unfallsimulation wären diese Rechnungen numerisch zu aufwändig, so dass mit Hilfe dieses Programms eine Bibliothek aufgebaut werden müsste, so dass einfache Dosisleistungskorrelationen für COCOSYS etwa in Abhängigkeit von RN-Konzentration, Raumgröße und Raumgestalt eingebracht werden kann. Für die Berechnung der Strahlenexposition außerhalb der Anlage werden Modelle wie das Lagrange-Partikelmodell oder ein Gauß-Fahnenmodell verwendet, die beispielsweise in RODOS gegeben sind. Sie dienen auch der Berechnung der atmosphärischen Ausbreitung und Deposition. Ferner werden die Expositionspfade (u. a. Inhalation, Ingestion) berücksichtigt, um die Dosis zu ermitteln. Die für die Ingestion relevanten Transferaten von Tritium in Pflanzen beispielsweise sind Gegenstand aktueller Forschung und erfordern eine Aktualisierung alter Modelle.

## **6.8            Anpassung von AC<sup>2</sup> für Fusionsanwendungen**

AC<sup>2</sup> ist ein etabliertes Werkzeug aus der Kerntechnik, das aber bisher nicht für Fusionsanlagen angepasst oder validiert wurde. Daher können die folgenden Phänomene nicht oder nur stark vereinfacht berücksichtigt werden, was wichtige Einschränkungen für den Einsatz in Sicherheitsanalysen bedeutet:

- Arbeitsmedien:
  - Eisbildung, Modellierung von He (bisher lediglich superkritischer Zustand)

- Wasserstoffisotopen (Q2) als nicht-kondensierbare Gase / Arbeitsmedien (Zwei-phasenströmung) im Brennstoffkreislauf
- LiPb (WCLL) soll wie Pb implementiert werden
- Erweiterung der Fluideigenschaften sowohl auf Vakuum als auch auf Hochdruck
- Existenz von mehreren Arbeitsmedien im selben Volumen / Kreislauf
- Optimierte Druckverlustkorrelationen für Strömungskanäle in Fusionsanlagen
- Wärmeübergänge: Fehlende Korrelationen für Schüttbetten, aufgeraute Oberflächen bzw. für den Tröpfchenschlag,
- Chemische Reaktionen: Bisher fehlende Modelle für die Reaktionen von Wolfram bzw. Beryllium mit Wasserdampf oder Sauerstoff,
- Transport: Fehlende Modelle für HT- bzw. HTO-Transport, ACP
- Tritiumpermeation / -retention in Strukturen
- Dosisberechnung: Bisher fehlende Implementierung der Ortsdosisleistung in der Anlage, veraltete Modelle für die Dosisberechnung außerhalb der Anlage.
- Optimierte Komponentenmodelle für die integrale Simulation von Systemkomponenten in Fusionsanlagen (z. B. Magnetkühlsysteme, Wärmetauscher, usw.)
- Bereitstellung von Kopplungsschnittstellen zur weiteren Simulationsprogrammen, die für Fusionsanlagen für spezifische Fragestellungen (Inventarberechnung, Magnetohydrodynamik, usw.) genutzt werden.

## 6.9 Schlussfolgerung

AC<sup>2</sup> kann durch gezielte Erweiterungen und Verwendung bzw. Kopplung mit spezialisierten Codes (z. B. für Tritiumtransport, Staubentstehung, Transport und Entstehung von ACP bzw. für die Plasmaphysik) für die Bewertung von Fusionsanlagen genutzt werden. Dies erfordert die folgenden Maßnahmen:

- Entwicklung neuer Module (z. B. in Bezug auf den Tritiumtransport oder die chemischen Reaktionen),

- Verwendung von Ergebnissen spezialisierter Codes und Definition von Kopplungsschnittstellen, um Randbedingungen wie die Menge an Stäuben oder den Radionuklidvektor dem Code AC<sup>2</sup> zu übergeben,
- Erstellung von Korrelationen für die Dosisleistung innerhalb der Anlage,
- Ertüchtigung veralteter Modelle für die Bestimmung der Dosis außerhalb der Anlage,
- Ergänzung von Modellen für die integrale Simulation von typischen Komponenten in einer Fusionsanlage
- Validierung der Modelle an Experimenten wie beispielsweise EVITA oder ICE in Bezug auf die Thermohydraulik in Stör- bzw. Unfallszenarien.

Durch diese Maßnahmen wird Deutschland mittels einer nationalen Rechenkette in die Lage versetzt, das Gefährdungspotential zukünftiger Fusionsanlagen unabhängig und wissenschaftlich fundiert zu bewerten – eine zentrale Voraussetzung für die Sicherheitsbewertung und Genehmigung.

## **7 Weiterentwicklung der Regulatorik von Fusionsanlagen in Deutschland**

### **7.1 Gesetze und Verordnungen**

Im Folgenden werden Entwicklungsmöglichkeiten aufgezeigt, wie die bestehende Rechtslage in Deutschland weiterentwickelt werden könnte.

#### **7.1.1 Aufnahme der Fusion in das AtG**

Ein denkbares Szenario wäre die Aufnahme der Fusion in das AtG. Dies könnte beispielsweise durch die Erweiterung der Definition einer kerntechnischen Anlage erfolgen. Dies hätte allerdings einige Folgen.

Zunächst würde dies erheblichen Gesetzgebungsaufwand produzieren. Hintergrund ist, dass sich die Logik des AtG auf den Umgang mit spaltbarem Material und die damit verbundenen Risiken fokussiert, insbesondere auf Fragen der nuklearen Sicherheit. Nukleare Sicherheit umfasst neben dem Strahlenschutz zusätzlich noch den Schutz vor den Gefahren der Kernenergie, § 2 Abs. 3a Nr. 2 AtG. Gefahren der Fusion als Kernenergie, welche über Strahlenschutzaspekte hinausgehen, insbesondere das Kritikalitätsrisiko in der Kernspaltung, sind allerdings nicht ersichtlich. Diese Thematik wird auch in den dem AtG unterlagerten Regelungen entsprechend adressiert, welche daher so nicht auf die Fusion anwendbar sind.

Hinzu kommt, dass das AtG in den letzten Jahrzehnten zu einem Ausstiegsgesetz wurde, was sowohl in der geänderten Zielsetzung des § 1 Abs. 1 AtG als auch in der Vielzahl detaillierter Regelungen, etwa der §§ 7e – 7g AtG, deutlich wird. Mit am deutlichsten zeigt sich dies darin, dass aufgrund des Atomausstiegs keine Genehmigungen mehr für neue kerntechnische Anlagen zur kommerziellen Erzeugung von Elektrizität erteilt werden, § 7 Abs. 1 S. 2 AtG. Weitere Regelungen, die sich auf den Ausstieg konzentrieren, finden sich an mehreren Stellen. Die Aufnahme der Fusion in das AtG würde somit eine grundlegende Revision des AtG mit sich führen.

Würden Fusionsanlagen als kerntechnischen Anlagen im AtG reguliert werden und würde die Genehmigungslogik des § 7 AtG in der Fassung vor dem Atomausstieg

übernommen, so läge es auch bei Vorliegen der Genehmigungsvoraussetzungen im Ermessensspielraum der Genehmigungsbehörde, die Genehmigung nicht zu erteilen.

### **7.1.2 Fortentwicklung des StrlSchG**

Die Fusion ist bereits heute im StrlSchG verankert, da Fusionsanlagen Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung sind. Eine mögliche Erweiterung ist die Klarstellung im Wortlaut des § 5 Abs. 2 StrlSchG, dass eine Fusionsanlage ebenfalls unter den Begriff der Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung fällt. Dies kann als eigene Anlagenkategorie geschehen oder als Unterfall einer Plasmaanlage. Nimmt man Fusionsanlagen als eigene Anlagenkategorie auf, so wäre hierbei zu beachten, dass die Errichtungsgenehmigung nach § 10 Abs. 1 StrlSchG nach entsprechendem Anlagentyp innerhalb der Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung differenziert. Fusionsanlagen sind aktuell als Plasmaanlagen genehmigt, für welche eine Errichtungsgenehmigung notwendig ist. Möchte man das Erfordernis einer Errichtungsgenehmigung für Fusionsanlagen beibehalten, so müssten diese ebenfalls in § 10 Abs. 1 StrlSchG aufgenommen werden. Ein entsprechendes Gesetzgebungsverfahren, welches die Fusionsanlage als eigenen Anlagentyp in § 5 Abs. 2 StrlSchG aufnimmt und für diese eine Errichtungsgenehmigung erfordert, wird zurzeit vorbereitet /BUN 26/.

Weiterhin könnten Regelungsgedanken zur Beschleunigung und Vereinfachung des Genehmigungsverfahrens aus energierechtlichen Fachgesetzen, welche sich mit Großanlagen und deren Umweltauswirkungen beschäftigen, wie dem AtG oder dem BImSchG, in das StrlSchG übernommen werden.

Zum einen wäre die Einführung einer Konzentrationswirkung einer strahlenschutzrechtlichen Errichtungsgenehmigung in Anlehnung der § 8 AtG oder § 13 BImSchG denkbar. Dies hätte den Vorteil, dass die strahlenschutzrechtlichen Genehmigungen sämtliche anderen öffentlich-rechtlichen Genehmigungen umfassen würde, insbesondere Baugenehmigungen oder wasserrechtliche Genehmigungen. Dies würde für den Antragsteller eine Erleichterung des Verfahrens darstellen und auch die Anzahl der vom Antragssteller zu kontaktierenden Behörden reduzieren.

Eine andere mögliche Ergänzung umfasst die Abschichtung des Verfahrens in mehrere Teilgenehmigungen nach dem Vorbild der §§ 7a ff. AtG oder § 11 BImSchG. Dies hätte den Vorteil, dass der Antragsteller bereits während der Designphase erste Schritte der Anlage genehmigen lassen könnte und hierbei Rechtssicherheit erhält. Analog zu den

Regelungen in AtG und AtVfV wären dann Anforderungen an die Darlegung des Gesamtvorhabens zu stellen, um die Rechte Dritter im Gesamtverfahren zu gewährleisten.

Denkbar wäre zudem die Errichtung von Ermächtigungsgrundlagen für den Erlass von Rechtsverordnungen, die einzelne Verfahrensaspekte regeln, ähnlich wie der §§ 11 und 12 AtG oder § 7 BImSchG. Dies würde eine Verortung der Fusionsregulierung in das StrlSchG erlauben, könnte aber gleichzeitig fusionsspezifische Teilregelungen in eine Fusionsverordnung auslagern und hierbei der Exekutive erlauben, kleinteiligere Regelungen zu treffen.

### **7.1.3 Entwicklung eines Fusionsgesetzes**

Statt einer Erweiterung des StrlSchG ist es ebenso denkbar, ein eigenes Fusionsgesetz (FusionsG) zu erlassen und die in Abschnitt 7.1.2 vorgeschlagenen Regelungen dort zu verankern. Ob detaillierte Regelungen zur Fusion Teil des StrlSchG oder Teil eines eigenen Gesetzes werden sollen, ist eine politische Frage. Die Einführung eines eigenen FusionsG würde ein politisches Zeichen des Alleinstellungsmerkmals der Fusion darstellen, aber je nach Konstruktion entweder einige Dopplungen zu oder einige Verweise in das StrlSchG und das AtG enthalten. Umgekehrt kann die Aufnahme von Detailregelungen spezifisch für die Fusion in das StrlSchG die Gesetzessystematik beeinträchtigen, zum einen durch die Einführung von Paragraphen, die mit Buchstaben nummeriert sind (bspw. §§ 13a-f StrlSchG), sowie zu Regelungen, die sich nicht generell auf Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung beziehen, sondern spezifisch auf den Subtyp der Fusionsanlage.

Ein Vorteil eines FusionsG liegt darin, dass man analog der § 1 BImSchG, § 1 StrlSchG und § 1 AtG eigene Zwecke des Gesetzes definieren könnte. Für die Fusion könnte dies neben der Sicherheit auch der Schutz der inneren und äußeren Sicherheit der Bundesrepublik Deutschland sowie die Erfüllung internationaler Verpflichtungen auf dem Gebiet des Strahlenschutzes enthalten.

Als grobe Abschätzung kann man sagen, dass je mehr fusionsspezifische Regelungen geschaffen werden, insbesondere im Hinblick auf die Errichtung und den Betrieb mehrerer kommerzieller Fusionskraftwerke, desto eher bietet sich die Auslagerung dieser Regelungen in ein eigenes FusionsG an. Zu beachten ist hierbei, dass die Entwicklung eines neuen Gesetzes regelmäßig mehr Zeit in Anspruch nimmt als die Aufnahme einzelner neuer Regelungen in ein bestehendes Gesetz.

#### **7.1.4 Sonstiger Änderungsbedarf**

##### **Haftung**

Aufgrund der Regelung der Fusion als Anlage zur Erzeugung ionisierender Strahlung im StrlSchG besteht ein Regelungsbedarf in § 26 Abs. 2 AtG, um eine Ambiguität zu beseitigen. Nach dieser Regelung wird die Haftungsnorm des § 26 Abs. 1 AtG entsprechend angewendet für Fälle, in denen ein Schaden durch die Wirkung eines Kernvereinigungsvorgangs verursacht wird. In § 26 Abs. 1 AtG sind allerdings Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung bereits aufgeführt, ebenso ergibt sich die Anwendung des § 26 Abs. 1 AtG bereits aus dem Verweis des § 176 StrlSchG. Ein ersatzloses Streichen des § 26 Abs. 2 AtG würde diese Ambiguität eliminieren, ohne etwas an der Regelung selbst zu ändern.

Eine ähnliche Ambiguität findet sich auch in der AtDeckV. Diese differenziert zwischen Reaktoren, sonstigen Kernanlagen und Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung. Hierbei gibt es Stand heute keine Klarstellung, ob mit Reaktoren nur Kernspaltungsreaktoren gemeint sein sollen und Fusionsreaktoren nicht darunterfallen. Diese Differenzierung ist entscheidend, da diese den Unterschied macht zwischen einer Deckungsvorsorge in Höhe von 25 Millionen Euro für Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung sowie bis zu 2,5 Milliarden Euro für Reaktoren.

##### **Periodische Sicherheitsüberprüfungen**

Zu überlegen ist weiterhin, ob für Fusionsanlagen periodische Sicherheitsüberprüfungen analog des § 19a AtG zu fordern wären. Dafür spricht, dass zum Zeitpunkt der Genehmigung insbesondere früher Fusionsanlagen einige sicherheitsrelevante Fragestellungen und Szenarien mangels Erfahrung möglicherweise nicht bekannt sind. Weiterhin kann sich der Stand von Wissenschaft und Technik über die Jahre oder Jahrzehnte eines Betriebs weiterentwickeln. Inwieweit eine periodische Sicherheitsüberprüfung auch für Fusionsanlagen erforderlich ist, muss auf Basis des Gefährdungspotentials der zukünftigen Anlagen festgelegt werden.

##### **Baurecht**

Ein weiterer Änderungsbedarf kann im BauGB gesehen werden, um eine dortige Ambiguität auszuräumen. Fusionsanlagen werden wohl vorwiegend nicht im bebauten Gebiet liegen, sondern im sogenannten baurechtlichen Außenbereich. Allerdings ist es dort

grundsätzlich unzulässig, bauliche Anlagen zu errichten. Eine Erleichterung besteht für privilegierte Vorhaben nach § 35 Abs. 1 BauGB. Zu diesen gehören nach § 35 Abs. 1 Nr. 7 BauGB auch Vorhaben, die der Erforschung, Entwicklung oder Nutzung der Kernenergie zu friedlichen Zwecken oder der Entsorgung radioaktiver Abfälle dient, mit Ausnahme der Neuerrichtung von Anlagen zur Spaltung von Kernbrennstoffen zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität. Fraglich ist hierbei, ob eine Fusionsanlage der Erforschung, Entwicklung oder Nutzung der Kernenergie zu friedlichen Zwecken dient. Hierfür streitet der physikalische Charakter der Fusionsenergie sowie der ähnlich lautende Wortlaut im Kompetenztitel des Art. 73 Nr. 14 GG. Dagegen spricht aber die Historie der Regelung, welche für die Kernspaltung geschaffen wurde. Es wird empfohlen, diese Ambiguität aufzulösen. Eine Klarstellung im Wortlaut könnte somit die Fusion explizit privilegieren oder explizit aus dieser Privilegierung herausnehmen.

## **7.2 Untergesetzliches Regelwerk**

Das untergesetzliche Regelwerk wird parallel mit der Konkretisierung von Anlagendesigns entwickelt werden. Zum jetzigen Zeitpunkt wird ein Schwerpunkt auf der Festlegung von Sicherheitszielen liegen müssen. Mit der Konkretisierung von Anlagendesigns wird es möglich werden, auch detaillierte Vorgaben in das untergesetzliche, technische Regelwerk aufzunehmen.

Ein zielorientiertes Vorgehen erlaubt es dem Antragsteller, freier über die Umsetzung von Ausrüstungen und Maßnahmen zur Einhaltung von Schutzvorschriften zu entscheiden, bedarf aber möglicherweise einer umfangreicheren Nachweisführung gegenüber der Genehmigungsbehörde. Ein präskriptiver Regulierungsansatz schränkt den Spielraum des Antragstellers ein, kann aber eine einfachere Nachweisführung erlauben und damit den Genehmigungsprozess vereinfachen.

Der aktuelle rechtliche Rahmen sowie dessen im vorigen Abschnitt vorgeschlagene Weiterentwicklung setzt einen zielorientierten Rahmen. Im Folgenden wird diskutiert, wie dieser auf der technischen Ebene konkretisiert werden kann.

### **7.2.1 Schutzziele**

Die grundsätzlichen übergeordneten radiologischen Ziele, die für Fusionsanlagen gelten, sind im Strahlenschutzgesetz benannt. Sie sind wie folgt:

- Dosisbegrenzung (§ 9 StrlSchG),
- Vermeidung unnötiger Exposition und Dosisreduzierung (§ 8 StrlSchG).

In der StrlSchV werden „Schutzziele“ im Zusammenhang mit der Störfallvorsorge nach § 104 StrlSchV erwähnt, aber nicht explizit definiert.

Mit Blick auf das Gefährdungspotential von Fusionsanlagen können aus ReFus-Sicht folgende abgeleitete Schutzziele für Fusionsanlagen herangezogen werden:

- Einschluss des radioaktiven Inventars,
- Strahlenschutz (Abschirmung, Aufenthaltsdauer, ...),
- ggf. Wärmeabfuhr.

Die ersten beiden Schutzziele entsprechen IAEA-Anforderungen und sind unstrittig anwendbar. Inwieweit die Wärmeabfuhr ein eigenes Schutzziel darstellt, ist noch weiter zu untersuchen, auch anhand konkreter Anlagendesigns und quantifizierter potentieller Auswirkungen von Ereignissen. Eine explizite Nennung der Schutzziele und entsprechende Ergänzung in einer Allgemeinen Verwaltungsvorschrift gemäß § 104 Abs. 6 StrlSchV wäre zu erwägen.

## **7.2.2      Gestufte Anwendung des Regelwerks**

Im Bereich der Kerntechnik ist es üblich, die an kerntechnische Einrichtungen gestellten Anforderungen in Abhängigkeit ihres Gefahrenpotentials abzustufen. So formuliert die IAEA in den GSR Part 4 einen „graded approach“ (gestuften Ansatz, Requirement 1 in GSR Part 4) beim Sicherheitsnachweis, der es erlaubt, den Umfang und den Detailgrad des Sicherheitsnachweises in Abhängigkeit vom Gefährdungspotenzial festzulegen. Dabei sind die möglichen Emissionen im Normalbetrieb und bei Stör- und Unfällen ebenso zu berücksichtigen wie die Möglichkeit sehr seltener Ereignisse mit besonders hohen Auswirkungen. Weiterhin sind die technologische Reife und die Komplexität einer Anlage zu berücksichtigen.

Eine exemplarische Umsetzung des gestuften Ansatzes für die Anwendung der Specific Safety Requirements der IAEA für Forschungsreaktoren /IAEA 16/, die dazu in Absatz 2.17 verschiedene Kriterien formulieren, kann für einen gestuften Ansatz beim

Sicherheitsnachweis für Forschungsreaktoren herangezogen werden. Ein Leitfaden zur Umsetzung dieses gestuften Vorgehens findet sich im Specific Safety Guide /IAEA 23/.

Auch in Deutschland wird für Forschungsreaktoren ein solcher Ansatz verfolgt /BMU 23/. Demnach „muss das Ziel der Einhaltung der Schutzziele „Kontrolle der Reaktivität“, „Kühlung der Brennelemente“ und „Einschluss radioaktiver Stoffe“ auch bei einer abgestuften Anwendung der Anforderungen stets gewährleistet werden. Allerdings können die Anforderungen, um diese Ziele zu erreichen, wie zum Beispiel die Anforderungen an die Nachzerfallswärmeabfuhr, abgestuft werden.“

Als Kriterien für einen gestuften Ansatz wird hier /BMU 23/ zunächst die Leistung eines Forschungsreaktors genannt. Weiterhin wird ausgeführt, dass bspw. das Schutzziel der Kernkühlung nicht abgestuft werden darf, jedoch die Anforderungen an die Systeme zur Kernkühlung unterschiedlich sein können, je nachdem ob die Wärmeabfuhr passiv (ohne Kühlwasser), passiv (mit Kühlwasser) oder aktiv erfolgt.

Mit Blick auf den Einschluss der radioaktiven Stoffe könnte eine Unterscheidung damit begründet werden, ob sich mögliche Auswirkungen einer Freisetzung auf das Reaktor-gebäude oder auf das Betriebsgelände begrenzen oder ob Auswirkungen über das Betriebsgelände hinaus möglich sind /BMU 23/.

Auch das deutsche Strahlenschutzregelwerk formuliert bereits jetzt mehrstufige Anforderungen mit der Festlegung von Kriterien der Neutronenrate in § 10 Abs. 1 Ziffer 1 StrlSchG für die Erfordernis einer Errichtungsgenehmigung und einer weiteren Schwelle in Form des Vielfachen der Freigrenzen im § 104 Abs. 4 und § 106 Abs. 3 StrlSchV. Letztere erfordern die Auseinandersetzung mit Stör- und Unfällen und entsprechende Nachweise im Genehmigungsverfahren. Umfang, Nachweistiefe und Methodik sind nicht näher spezifiziert. Eine abgestufte, definierte Festlegung dieser Anforderungen könnte eine Unterstützung im Genehmigungsverfahren für Antragsteller, Sachverständige und Behörden sein, mit der eine hinsichtlich der Maßstäbe bundeseinheitliche und transparente Vorgehensweise gefördert würde.

Eine entsprechende Abstufung hat sich am Gefährdungspotenzial einer Anlage zu orientieren. Wie in Abschnitt 5.3.2 dargestellt, liegt das radiologische Gefährdungspotential von Fusionsanlagen deutlich unter dem von Kernkraftwerken, möglicherweise aber im Größenordnungsbereich des Gefährdungspotentials von Kernspaltungsforschungsreaktoren.

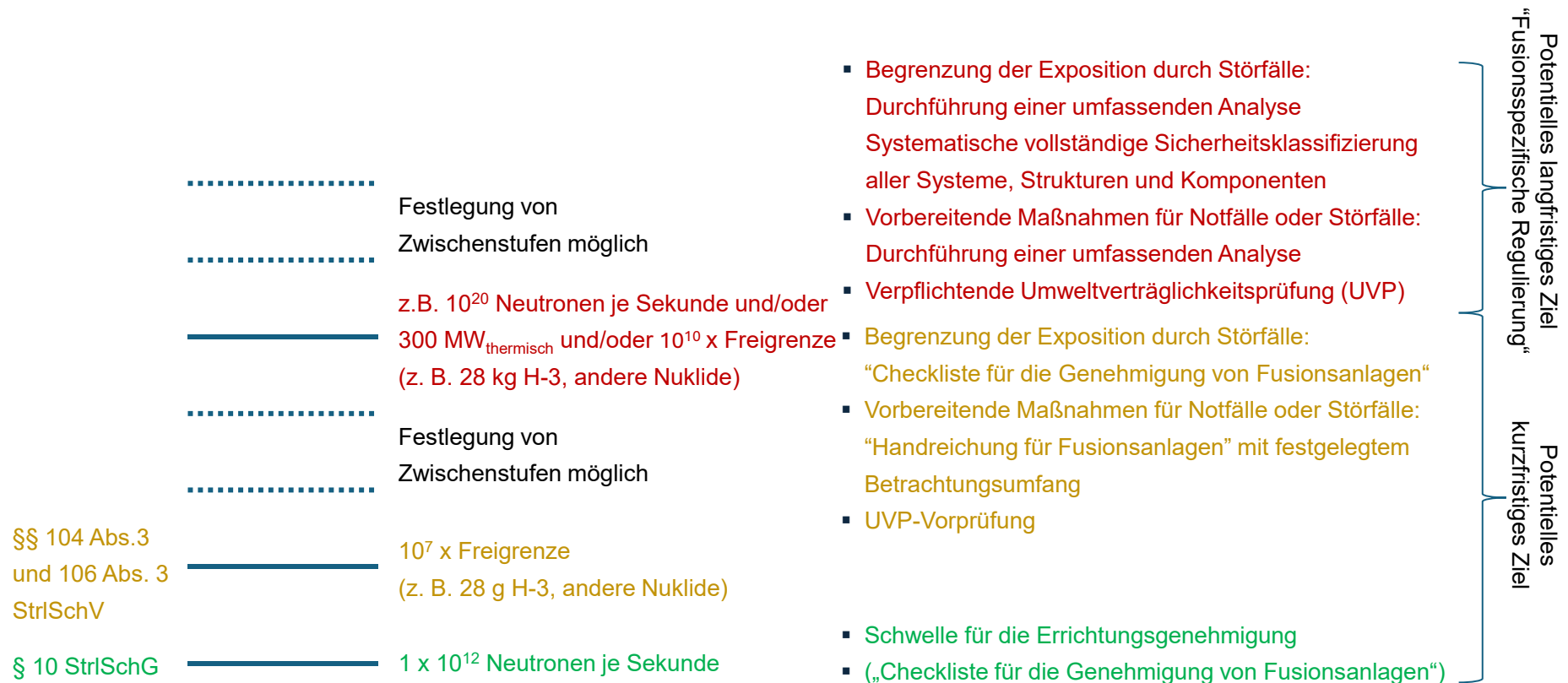
Als Kriterien für die Festlegung abgestufter Maßnahmen kommen aus Sicht von ReFus grundsätzlich in Frage:

- Neutronenrate und Anzahl der erzeugten Neutronen,
- Leistung der Anlage,
- Inventar an radioaktiven Stoffen.

Mit Blick auf das relative Gefährdungspotential von Fusionsanlagen im Vergleich zu anderen nach Strahlenschutzrecht genehmigten Anlagen sowie kerntechnischen Anlagen (vgl. Kapitel 5) könnten stringendere Anforderungen bezüglich Nachweistiefe und -methoden als im bestehenden Strahlenschutzrecht festgelegt werden. Es ist denkbar, ab einer gewissen Anlagengröße eine zusätzliche Schwelle für weitere Anforderungen zu definieren. Die genauen Werte der Schwelle sind zu diskutieren. Als eine erste Orientierung könnten Werte einer Größenordnung von  $1 \cdot 10^{20}$  n/s verwendet werden, dies entspricht etwa einer (thermischen) Leistung von 300 MW. Solche Werte werden bereits heute in China /WAN 25/ und Russland /POL 25/ verwendet.

Nachteil eines Schwellenwertes in Form von Neutronenrate oder Leistung wäre allerdings, dass Anlagen mit unterschiedlichen Inventaren gleiche Anforderungen erfüllen müssten. Letztlich werden Anlagen mit einem hohen Abbrand und einer geringen Menge Tritium im Fusionsgefäß bei gleicher Leistung aufgrund des geringeren Inventars ein geringeres Gefährdungspotential haben. Das gleiche gilt auch für Anlagen, die aktivierungsarme Materialien verwenden oder anfallende Kontaminationen zielgerichtet entfernen. Aus diesem Blickwinkel erscheint die Verwendung eines Aktivitätsschwellenwertes für das radioaktive Inventar als adäquateres Kriterium. Beispielhaft sind in Abb. 7.1 das  $1 \cdot 10^{10}$ -fache der Freigrenzen nach Anlage 1 Tabelle 1 Spalte 1 StrlSchV genannt. Eine solche Schwelle sollte die potentiell möglichen Auswirkungen außerhalb des Anlagen geländes sowohl in Höhe als auch Dauer berücksichtigen.

Unterhalb solcher Schwellenwerte könnten die Regelungen der Strahlenschutzgesetzgebung analog wie bisher weiter unmittelbar Anwendung finden, unterstützt durch untersetzende Merkpostenlisten wie etwa einer Checkliste für die Genehmigung von Fusionsanlagen sowie einer Handreichung für Fusionsanlagen, die Behandlung vorbereitender Maßnahmen für Störfälle und Unfälle betreffend, vgl. Abb. 7.1. Mit wachsender Kenntnis von Anlagendesigns kann es sinnvoll sein, weitere Abstufungen der Regelwerksanforderungen zu definieren.



**Abb. 7.1** Vorschlag für Stufung des technischen Regelwerks und mögliche Regelwerksuntersetzungen

Oberhalb einer solchen Schwelle wäre zu bedenken, ob weitergehende Regelungen zu treffen sind, die aufgrund des wesentlich höheren Gefährdungspotentials eine systematische, vollständige Sicherheitsklassifizierung der Anlagen, Systeme und Komponenten der Fusionsanlage sowie eine umfassende Analyse von Notwendigkeit und Umfang vorbereitender Maßnahmen für Stör- und Unfälle erfordern. Hier könnte ggf. eine für Fusionsanlagen ausgearbeitete Regelung analog zu den Sicherheitsanforderungen für Kernkraftwerke /BMU 22/ entwickelt werden, wobei fusionsspezifische Gefährdungen bzw. deren Beherrschung oder fusionsspezifische Fachkundeanforderungen ergänzt werden könnten.

Im weiteren Projektverlauf sollen vertiefte Untersuchungen zu möglichen Kriterien für eine gestufte Regulierung von Fusionsanlagen durchgeführt werden.

Sollte sich zeigen, dass mittelfristig mit Fusionsanlagen zu rechnen ist, die die Kriterien für weitergehende sicherheitstechnische Anforderungen erfüllen können, so sollte zukünftig mit der Erarbeitung von spezifischen Sicherheitsanforderungen für Fusionsanlagen begonnen werden. Aufgrund der fehlenden Designtiefe von Anlagenkonzepten werden diese zunächst nur generischer Natur sein können.

### **7.2.3 Gremienstruktur**

Im Rahmen der kerntechnischen Aufsicht und der untergesetzlichen Regelsetzung wirken verschiedene Gremien mit. Hierzu zählen insbesondere Bund-Länder-Gremien, die der Abstimmung zwischen den zuständigen Behörden des Bundes und der Länder sowie der Förderung eines möglichst einheitlichen Vollzugs des Atom- und Strahlenschutzes dienen.

Daneben bestehen mit der Reaktor-Sicherheitskommission (RSK), der Strahlenschutzkommission (SSK) und der Entsorgungskommission (ESK) wissenschaftlich-technische Beratungsgremien, die das zuständige Bundesministerium in grundlegenden Fragen der nuklearen Sicherheit, des Strahlenschutzes sowie der Entsorgung radioaktiver Abfälle unterstützen. Die RSK befasst sich dabei vor allem mit der Sicherheit kerntechnischer Anlagen, die SSK mit dem Schutz von Mensch und Umwelt vor den Wirkungen ionisierender und nichtionisierender Strahlung und die ESK mit Fragen der Entsorgung radioaktiver Abfälle sowie der Stilllegung kerntechnischer Einrichtungen.

Von diesen Gremien zu unterscheiden ist der Kerntechnische Ausschuss (KTA), der kein wissenschaftliches Beratungsgremium darstellt, sondern als zusammengesetztes Regelsetzungsgremium sicherheitstechnische Regeln für kerntechnische Anlagen erarbeitet. In ihm wirken Vertreterinnen und Vertreter von Herstellern, Betreibern, Behörden, Sachverständigenorganisationen und weiteren Fachkreisen zusammen.

Für die Entwicklung eines Regelwerks für Fusionsanlagen könnten die bestehenden Gremien insbesondere durch fachliche Beratung, methodische Vorarbeiten und die Übertragung bewährter Regelungsprinzipien beitragen.

Bund-Länder-Gremien könnten die Abstimmung zwischen Bundes- und Landesbehörden unterstützen und damit einen einheitlichen Vollzug realisieren.

Die SSK könnte zur Einordnung von Fragen des Strahlenschutzes, insbesondere im Hinblick auf Neutronenstrahlung, Aktivierung, Tritiumfreisetzung sowie beruflicher Exposition, beitragen. Die ESK könnte bei der Bewertung von Fragen zur Entsorgung, Konditionierung, Zwischenlagerung und Stilllegung aktivierter oder tritiumkontaminierter Materialien einbezogen werden. Die RSK könnte bei Fragen der Anlagensicherheit einbezogen werden.

Es ist anzumerken, dass zu fusionsspezifischen Aspekten, wie z. B. Plasmaerzeugung und -einschluss, dem Brennstoffkreislauf, Materialbelastungen durch Plasma-Wand-Wechselwirkungen und hochenergetische Neutronen sowie mögliche Auswirkungen durch freisetzbare thermische oder magnetische Energien, wenig entsprechende Erfahrungswerte aus der Kerntechnik und aus Anlagen, die nach Strahlenschutzrecht reguliert werden, vorliegen. Insbesondere angesichts der noch andauernden Entwicklung von Fusionskonzepten ist daher das Einbeziehen der Fachexpertise von auf die Fusion spezialisierten Forschungseinrichtungen, Herstellern und Sachverständigenorganisationen für die angemessene Bewertung sicherheitstechnischer Fragestellungen der Fusion unabdingbar. Zu diesem Zweck könnten die bestehenden Gremien erweitert oder ein den genannten Gremien ähnliches wissenschaftlich-technisches Beratungsgremium, etwa eine Fusionskommission gebildet werden.

Eine Zusammenarbeit von Herstellern, Betreibern, Behörden, Sachverständigenorganisationen und weiteren Fachkreisen bei der Erstellung detaillierter technischer Regelwerke hat sich, beispielsweise im Rahmen des KTA, als wertvoll erwiesen. Wie in Kapitel 3.3.5 ausgeführt findet eine solche Zusammenarbeit auch in Bezug auf

Fusionstechnologien in Gremien wie DIN, CEN oder ISO sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene bereits statt. Zur Vermeidung von Parallelstrukturen wird die Bildung eines fusionsspezifischen Pendants zum KTA daher vom ReFus-Projekt zum gegenwärtigen Zeitpunkt als nicht sinnvoll angesehen.

#### **7.2.4 Normung**

Die Normung gewinnt mit Blick auf Fusionsanlagen und ihre international zu erwartende Verbreitung eine besonders tragende Rolle. Während bei kerntechnischen Anlagen in hohem Maße nationale Vorschriften dominierten und noch immer dominieren, sollte die Entwicklung des Regelwerks für Fusionsanlagen auf eine breitere internationale Basis gestellt werden, wie es bereits im Rahmen des DIN und internationaler Normungsgremien begonnen wurde, vgl. Kapitel 3.3.5. Diese Arbeiten sollten intensiviert und unter Einbeziehung aller relevanten Stakeholder ausgebaut werden, auch um im internationalen Maßstab adäquat mitwirken zu können. Dies betrifft insbesondere auch die Entwicklung und Normung sicherheits- und strahlenschutztechnischer Klassifizierungskriterien und entsprechender Auslegungsanforderungen. Ein besonderer Schwerpunkt ist dabei die Weiterentwicklung der DIN EN ISO 16646:2026-06 hinsichtlich eines „graded approach“. Die Normungsarbeiten werden den jeweiligen Wissensstand über Anlagendesigns zu berücksichtigen haben und dabei sicherstellen müssen, dass Entwicklungen von Designs nicht eingeschränkt werden.

## **Danksagung**

Die Arbeit wurde vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) im Rahmen des Fachprogramm Fusion 2040 – Forschung auf dem Weg zum Fusionskraftwerk unter den Förderkennzeichen 13F1002A-D gefördert. Die Autorinnen und Autoren danken den assoziierten Partnern für ihre Beiträge im Rahmen des Vorhabens.



## Literaturverzeichnis

- /ABA 25/ Abadie, P.-M.: Regulation ITER. Präsentation, International Atomic Energy Agency (IAEA), 69th IAEA General Conference: Wien, September 2025.
- /ABD 20/ Abdou, M., Riva, M., Ying, A., Day, C., Loarte, A., Baylor, L. R., Humrickhouse, P., Fuerst, T. F., Cho, S.: Physics and technology considerations for the deuterium-tritium fuel cycle and conditions for tritium fuel self sufficiency. Nuclear Fusion, Bd. 61, DOI 10.1088/1741-4326/abfb35, 23. November 2020.
- /AKB 26 Rn. 26/Akbarian, G. S., Raetzke, C. (Hrsg.): Strahlenschutzgesetz: StrlSchG - Mit Auszug aus der StrlSchV; § 13 StrlSchG Rn. 26. 2. Aufl., ISBN 978-3-406-83297-0, C.H. Beck: München, 2026.
- /AKB 26 Rn. 66/Akbarian, G. S., Raetzke, C. (Hrsg.): Strahlenschutzgesetz: StrlSchG - Mit Auszug aus der StrlSchV; § 13 StrlSchG Rn. 66. 2. Aufl., ISBN 978-3-406-83297-0, C.H. Beck: München, 2026.
- /AKB 26 Rn. 71 f./Akbarian, G. S., Raetzke, C. (Hrsg.): Strahlenschutzgesetz: StrlSchG - Mit Auszug aus der StrlSchV, § 13 StrlSchG Rn. 71 f. 2. Aufl., ISBN 978-3-406-83297-0, C.H. Beck: München, 2026.
- /AVV 22/ Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Strahlenpass nach § 174 der Strahlenschutzverordnung (AVV-Strahlenpass) in der Fassung vom 16. Juni 2022 (BAnz AT 23.06.2020 B6).
- /AVV 20/ Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ermittlung der Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung durch genehmigungs- oder anzeigebedürftige Tätigkeiten (AVV Tätigkeiten) in der Fassung vom 8. Juni 2020 (BAnz AT 16.06.2020 B3).
- /BAC 22/ Bachmann, C., Gliss, C., Janeschitz, G., Steinbacher, T., Mozzillo, R.: Conceptual study of the remote maintenance of the DEMO breeding blanket. Fusion Engineering and Design, Bd. 177, DOI 10.1016/j.fusengdes.2022.113077, April 2022.

- /BAI 21/ Bailey, G. W., Vilkhivskaya, O. V., Gilbert, M. R.: Waste expectations of fusion steels under current waste repository criteria. Nuclear Fusion, Bd. 61, Nr. 3, DOI 10.1088/1741-4326/abc933, Januar 2021.
- /BASE 26/ Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE): Handbuch Reaktorsicherheit und Strahlenschutz (RS-Handbuch) – Inhalt. Erreichbar unter [https://www.base.bund.de/de/service/gesetze-regelungen/handbuch-reaktorsicherheit-strahlenschutz/rsh-handbuch-reaktorsicherheit-strahlenschutz\\_inhalt.html](https://www.base.bund.de/de/service/gesetze-regelungen/handbuch-reaktorsicherheit-strahlenschutz/rsh-handbuch-reaktorsicherheit-strahlenschutz_inhalt.html), Stand von 2026.
- /BAT 23/ Batani, D., Colaïtis, A., Consoli, F., Danson, C. N., Gizzi, L. A., Honrubia, J., Kühl, T., Le Pape, S., Miquel, J.-L., Perlado, J. M., Scott, R. H. H., Tatarakis, M., Tikhonchuk, V., Volpe, L.: Future for inertial-fusion energy in Europe: a roadmap. High Power Laser Science and Engineering, Nr. 11, DOI 10.1017/hpl.2023.80, September 2023.
- /BAU 25/ Baumann, C., Romazanov, J., Matveev, D., Kirschner, A., Subba, F., Wiesen, S., Brezinsek, S., Linsmeier, C.: Global tungsten erosion and migration modeling for the EU-DEMO with the ERO2.0 code. Nuclear Fusion, Bd. 66, Nr. 2, DOI 10.1088/1741-4326/ae27e5, 24. Dezember 2025.
- /BEH 23/ Behler, M., Eisenstecken, T., Hannstein, V., Henry, R., Küntzel, M., Sommer, F., Travleev, A.: Methodenentwicklung im Bereich Nuklidinventar- und Abbrandberechnung, Abschlussbericht zum Vorhaben MODENA. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS, Nr. 710, Februar 2023.
- /BEIS 21/ Department for Business, Energy and Industrial Strategy (BEIS): Toward fusion energy: the UK government's proposals for a regulatory framework for fusion energy. 101 S., Oktober 2021.
- /BEL 99/ Bell, A. C., Ballantyne, P., Gordont, C., Wright, M. A.: The safety case for JET D-T operation. Fusion Engineering and Design, Nr. 47, S. 115–130, DOI 10.1016/S0920-3796(99)00080-0, Dezember 1999.
- /BET 79/ Bethe, H. A.: The fusion hybrid. Physics Today, Bd. 1979, Nr. 5, S. 44–51, DOI 10.1063/1.2995553.

- /BMBF 23/ Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Positionspapier Fusionsforschung, Auf dem Weg zur Energieversorgung von morgen. 32 S.: Berlin, 2023.
- /BMBF 24/ Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Förderprogramm Fusion 2040, Forschung auf dem Weg zum Fusionskraftwerk. 41 S.: Bonn, 2024.
- /BMU 22/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV): Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke, in der Fassung der Bekanntmachung vom 25. Februar 2022. BAnz AT 15.03.2022 B3: Bonn, 2022.
- /BMU 23/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV): Leitfaden zur Anwendung des kerntechnischen Regelwerks für Kernkraftwerke auf Forschungsreaktoren mittels eines abgestuften Ansatzes, Dokument aus dem Handbuch Reaktorsicherheit und Strahlenschutz. 10. Oktober 2023.
- /BMUB 15/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Interpretationen zu den „Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke vom 22. November 2012“, geändert am 3. März 2015. Berlin, 2015.
- /BMUKN 15/Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN): EU verabschiedet geänderte Richtlinie zur nuklearen Sicherheit. 15. Dezember 2015.
- /BMUKN 25/Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN): Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm). 19. November 2025.
- /BOY 16/ Boyer, H., Plummer, D., Johnston, J., JET contributors: JET Tokoamak, preparation of a safety case for tritium operations. Fusion Engineering and Design, Nr. Issues 109-111, S. 1308–1312, DOI 10.1016/j.fuseng-des.2015.12.037, November 2016.

- /BRE 15/ Brennecke, P.: Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle (Endlagerungsbedingungen, Stand: Dezember 2014). Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Fachbereich Sicherheit nuklearer Entsorgung, BfS-Dok.-Nr. 9KE/2211/D/ED/0001/03: Salzgitter, Februar 2015.
- /BUN 26/ Bundesregierung: Referentenentwurf der Bundesregierung eines Gesetzes zum Bürokratierückbau, zur Digitalisierung und zur weiteren Modernisierung des Strahlenschutzrechts. 2026.
- /CAM 10/ Cambi, G., Cepraga, d., Di Pace, L., Druyts, F., Massaut, V.: The potential presence and minimisation of plutonium within the irradiated beryllium in fusion power plants. *Fusion Engineering and Design*, Bd. 85, Nr. 7-9, S. 1139–1142, DOI 10.1016/j.fusengdes.2010.02.026, 2010.
- /CAR 22/ Caruso, G., Ciattaglia, S., Colling, B., Di Pace, L., Dongiovanni, D. N., D'Onorio, M., Garcia, M., Jin, X. Z., Johnston, J., Leichtle, D., Pinna, T., Porfiri, M. T., Raskob, W., Taylor, N., Terranova, N., Vale, R.: DEMO – The main achievements of the Pre – Concept phase of the safety and environmental work package and the development of the GSSR. *Fusion Engineering and Design*, Bd. 176, DOI 10.1016/j.fusengdes.2022.113025, Februar 2022.
- /CAR 24/ Carloni, D., Dacquait, F., Polunovskiy, E., Broutin, F., Di Pace, L., Javier, F., Moscatelli, E., Le Tonqueze, Y.: Use of the OSCAR-Fusion V1.4.a code for a preliminary assessment of the ACP contamination within the main ITER water cooling circuit. *Nuclear Fusion*, Bd. 64, Nr. 7, DOI 10.1088/1741-4326/ad4d00, Juni 2024.
- /CFS 22/ Commonwealth Fusion Systems: RE: Developing a Regulatory Framework for Fusion Energy Systems. Washington, DC (United States), 16. August 2022.
- /CoRWM 21/Committee on Radioactive Waste Management (CoRWM): Preliminary Position Paper: Radioactive Wastes from Fusion Energy. CoRWM Document, Nr. 3735, 1. Aufl.: London, November 2021.

- /CRE 20/ Creely, A. J., Greenwald, M. J., Ballinger, S. B., Brunner, D., Canik, J., Fülöp, T., Garnier, D. T., Granetz, R., Gray, T. K.: Overview of the SPARC tokamak. *Journal of Plasma Physics*, Bd. 86, Nr. 5, DOI 10.1017/S0022377820001257, 29. September 2020.
- /DIT 23/ Ditmire, T., Roth, M., Patel, P. K., Callahan, D., Cheriaux, G., Gibbon, P., Hammond, D., Hannasch, A., Jarrott, L. C., Schaumann, G., Theobald, W., Therrot, C., Turianska, O., Vaisseau, X., et al.: Focused Energy, A New Approach Towards Inertial Fusion Energy. *Journal of Fusion Energy*, Bd. 42, Nr. 2, DOI 10.1007/s10894-023-00363-x, 2023.
- /DOE 08/ Ambrosek, J., Longhurst, G. R.: Verification and Validation of TMAP7. US Department of Energy (DOE), Office of Science, INEEL/EXT-04-01657, Dezember 2008.
- /DOE 21/ US Department of Energy (DOE), Office of Environmental Management: Radioactive Waste Management Manual. DOE M 435.1-1 7-09-99, Change 3 (Limited Change): Washington, D.C., Januar 2021.
- /DOE 95/ US Department of Energy (DOE), Office of Arms Control and Nonproliferation (Hrsg.): The National Ignition Facility (NIF) and the issue of nonproliferation. Final study. DOE/NN--96007377, 88 S.: Washington, DC (United States), 19. Dezember 1995.
- /DON 23/ D'Onorio, M., Glingler, T., Porfiri, M. T., Dongiovanni, D. N., Ciattaglia, S., Gliss, C., Elbez-Uzan, J., Cortes, P., Caruso, G.: Development of a Thermal-Hydraulic Model for the EU-DEMO Tokamak Building and LOCA Simulation. *Energies*, Bd. 16, Nr. 3, DOI 10.3390/en16031149, 2023.
- /ELB 24/ Elbez-Uzan, J., Williams, L., Forbes, S., Dodaro, A., Stieglitz, R., Airila, M. I., Holden, J., Rosanvallon, S.: Recommendations for the future regulation of fusion power plants. *Nuclear Fusion*, Bd. 64, Nr. 3, DOI 10.1088/1741-4326/ad13ad, 2024.

- /ENG 16/ Englert, M., Harrington, A.: Next Generation Nuclear Technologies: New Challenges to the Legal Framework of the IAEA from Intense Neutron Sources. In: Black-Branch, J. L., Fleck, D. (Hrsg.): Nuclear Non-Proliferation in International Law: Volume II - Verification and Compliance. S. 187–212, ISBN 978-94-6265-075-6, DOI 10.1007/978-94-6265-075-6\_9, T.M.C. Asser Press: The Hague, 2016.
- /ESK 21/ Entsorgungskommission (ESK): Empfehlung der Entsorgungskommission, Leitlinien für die Zwischenlagerung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, vom 09.12.2021. 9. Dezember 2021.
- /ESK 23/ Entsorgungskommission (ESK): Empfehlung der Entsorgungskommission, Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern, verabschiedet in der 109. ESK-Sitzung am 07.09.2023. 7. September 2023.
- /EUR 21/ European Commission, Directorate-General for Energy (DG ENER), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Karlsruher Institut für Technologie (KIT): Study on the Applicability of the Regulatory Framework for Nuclear Facilities to Fusion Facilities – Towards a specific regulatory framework for fusion facilities. Final Report. Hrsg.: European Commission, ENER-20-NUCL-SI2.834242, DOI 10.2833/787609: Luxembourg, Dezember 2021.
- /FAG 08/ Faghihi, F., Havasi, H., Amin-Mozafari, M.: Plutonium-239 production rate study using a typical fusion reactor. Annals of Nuclear Energy, Bd. 35, Nr. 5, S. 759–766, DOI 10.1016/j.anucene.2007.09.020, 2008.
- /FED 19/ Federici, G., Bachmann, C., Barucca, L., Baylard, C., Biel, W., Boccaccini, L. V., Bustreo, C., Ciattaglia, S., Cismondi, F., Corato, V., Day, C., Diegele, E., Franke, T., Gaio, E., et al.: Overview of the DEMO staged design approach in Europe. Nuclear Fusion, Bd. 59, Nr. 6, DOI 10.1088/1741-4326/ab1178, 2019.

- /FEL 25/ Felton, R., Bickerton, S., Horton, L., Ciric, D., Knipe, S., Middleton, P., Banks, J., McCullen, P., Carvalho, I., Rimini, F.: Operational aspects of tritium injection into the JET tokamak. Plasma Physics and Controlled Fusion, Bd. 67, Nr. 9, DOI 10.1088/1361-6587/ae0207, 11. September 2025.
- /FRA 12/ Décret n° 2012-1248 du 9 novembre 2012 autorisant l'Organisation internationale ITER à créer une installation nucléaire de base dénommée « ITER » sur la commune de Saint-Paul-lez-Durance (Bouches-du-Rhône) in der Fassung vom 9. November 2012 (Journal officiel de la République française (JORF), Textnummer JORFTEXT000026601187).
- /FRA 22/ Ministère de la Transition écologique: 5e Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs. 2022.
- /FRA 24/ République Française: National report of France for the 8th review Meeting, Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. August 2024.
- /FUSE 25/ The IAEA Fusion Connect Platform (Hrsg.): Commonwealth Fusion Systems - Fusion Machine Profile. International Atomic Energy Agency (IAEA), erreichbar unter <https://nucleus.iaea.org/sites/connect/FUSEpublic/Site-Pages/SPARC.aspx>, Stand vom November 2025.
- /GAU 25/ Gauss Fusion GmbH: Conceptual Design Report - Executive Summary, An overview of Gauss Fusion's GIGA plant-level concept. Erreichbar unter <https://gauss-fusion.com/cdr-executive-summary>, abgerufen am 29. Juni 2026.
- /GEO 24/ George, R., Bickerton, S., Cahill, P., Dalgliesh, P., Davies, S., Franklin, O., Hayes, N., Jackson, T., Kennedy, D., Knight, M.: JET Active Gas Handling System-operating experience and lessons learned from recent D-T campaigns. Plasma Physics and Controlled Fusion, Bd. 67, DOI 10.1088/1361-6587/ad9e76, 20. Dezember 2024.

- /GIL 17/ Gilbert, M. R., Eade, T., Bachmann, C., Fischer, U., Taylor, N. P.: Activation, decay heat, and waste classification studies of the European DEMO concept. Nuclear Fusion, Bd. 57, Nr. 4, DOI 10.1088/1741-4326/aa5bd7, März 2017.
- /GLA 12/ Glaser, A., Goldston, R. J.: Proliferation risks of magnetic fusion energy: clandestine production, covert production and breakout. Nuclear Fusion, Bd. 52, Nr. 4, DOI 10.1088/0029-5515/52/4/043004, 2012.
- /GON 22/ Gonzalez de Vicente, S. M., Smith, N. A., El-Guebaly, L., Ciattaglia, S., Di Pace, L., Gilbert, M., Mandoki, R., Rosanvallon, S., Someya, Y., Tobita, K., Torcy, D.: Overview on the management of radioactive waste from fusion facilities: ITER, demonstration machines and power plants. Nuclear Fusion, Bd. 62, Nr. 8, S. 85001, DOI 10.1088/1741-4326/ac62f7, 2022.
- /GRB 25/ GRB - Sammelstelle Bayern für radioaktive Stoffe GmbH: Annahmebedingungen der Landessammelstelle Bayern für radioaktive Abfälle (LBA), Ausgabe: März 2025. Mitterteich, März 2025.
- /GRB 26/ GRB - Sammelstelle Bayern für radioaktive Stoffe GmbH: Preisliste der Landessammelstelle Bayern für radioaktive Abfälle (LBA), Ausgabe: Juni 2026. Mitterteich, Juni 2026.
- /GRI 21/ Grisolia, C., Hodille, E., Pečovnik, M., Ialovega, M., Bernard, E., Angot, T., Martin, C., Ferro, Y., Layet, J. M., Sakamoto, R., Benannoune, S., Charles, Y., Baker, A. de, Delaporte-Mathurin, R., et al.: Modelling of Hydrogen Trapping, Diffusion and Permeation in Tokamak. Nuclear Fusion, Bd. 61, Nr. 12, DOI 10.1088/1741-4326/ac2abc, Oktober 2021.
- /HÄF 23/ Häfner, L., Alexander, N., Betti, R., Hurricane, O., Ma, T., Stieglitz, R., Zohm, H.: Memorandum Laser Inertial Fusion Energy. Hrsg.: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Mai 2023.
- /HEC 12/ Hecker, S. S., Englert, M., Miller, M. C.: Nuclear non-proliferation. In: Ginley, D. S., Cahen, D. (Hrsg.): Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability. S. 162–177, ISBN 9780511718786, DOI 10.1017/CBO9780511718786.017, Cambridge University Press, Juni 2012.

- /HOE 21/ Hoelzl, M., Huijsmans, G. T. A., Pamela, S. J. P., Bécoulet, M., Nardon, E., Artola, F. J., Nkonga, B., Atanasiu, C. V., Bandaru, V., Bhole, A.: The JOEREK non-linear extended MHD code and applications to large-scale instabilities and their control in magnetically confined fusion plasmas. Nuclear Fusion, Bd. 61, Nr. 6, DOI 10.1088/1741-4326/abf99f, Mai 2021.
- /HUM 23/ Humrickhouse, P.: Decay Heat Management in Fusion Reactors. Präsentation, International Atomic Energy Agency (IAEA), Conference: IAEA Technical Meeting on Fusion Design Safety and Regulation: Wien, 23. - 25. Oktober 2023.
- /IAEA 88/ International Atomic Energy Agency (IAEA): The Radiological Accident in Goiânia. Wien, 1988.
- /IAEA 09/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Classification of Radioactive Waste, General Safety Guide. IAEA Safety Standards Series, No. GSG-1: Wien, 2009.
- /IAEA 16/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Safety of Research Reactors, Specific Safety Requirements. IAEA Safety Standards Series, No. SSR-3: Wien, 2016.
- /IAEA 22/ International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA Safeguards Glossary, 2022 Edition. International Nuclear Verification Series, No. 3 (Rev. 1): Wien, 2022.
- /IAEA 23/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Use of a graded approach in the application of the safety requirements for research reactors, Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series, No. SSG-22 (Rev. 1): Wien, 2023.
- /IAEA 25/ International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA World Fusion Outlook 2025. 3. Aufl., Oktober 2025.
- /ICRP 07/ International Commission on Radiological Protection (ICRP): The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP, Publication 103, 2007.

- /ITER 99/ ITER Physics Expert Group on Disruptions, Plasma Control, and MHD, ITER Physics Basic Editors: Chapter 3: MHD stability, operational limits and disruptions. Nuclear Fusion, Bd. 39, DOI 10.1088/0029-5515/39/12/303, 1999.
- /JIN 24/ Jin, X. Z., Raskob, W.: Preliminary accident analysis of the loss of vacuum in vacuum vessel for the European DEMO HCPB blanket concept. Nuclear Fusion, Bd. 64, Nr. 5, DOI 10.1088/1741-4326/ad383b, 2024.
- /JOH 24/ Johnston, J., Perry, D., JET contributors: An overview of the preparation and implementation of the safety case in support of the 2nd JET deuterium-tritium experiment. Plasma Physics and Controlled Fusion, Nr. 66, DOI 10.1088/1361-6587/ad4d1b, Juni 2024.
- /KAL 95/ Kalinowski, M. B., Colschen, L. C.: International Control of Tritium to Prevent Horizontal Proliferation and to Foster Nuclear Disarmament. Science & Global Security, Bd. 5, Issue 2, S. 131–203, DOI 10.1080/08929889508426422, 1995.
- /KAL 04/ Kalinowski, M. B.: International Control of Tritium for Nuclear Nonproliferation and Disarmament. ISBN 9780203569337, DOI 10.1201/9780203569337, CRC Press, 2004.
- /KAN 25/ Kanth, P., Gilbert, M. R., Rosanvallon, S., Elbez-Uzan, J.: Parameters affecting EU-DEMO radioactive waste generation and mitigation techniques. Fusion Engineering and Design, Bd. 220, S. 115301, DOI 10.1016/j.fusengdes.2025.115301, 2025.
- /KAN 25/ Kanth, P., Gilbert, M. R., Rosanvallon, S., Elbez-Uzan, J.: Parameters affecting EU-DEMO radioactive waste generation and mitigation techniques. Fusion Engineering and Design, Bd. 220, DOI 10.1016/j.fusengdes.2025.115301, November 2025.
- /KAR 07/ Karditsas, P., Caloutsis, A.: Corrosion and activation in fusion cooling loops - TRACT. Fusion Engineering and Design, Bd. 82, Nr. Issues 15-24, S. 2729–2733, DOI 10.1016/j.fusengdes.2007.03.025, Oktober 2007.

- /KIM 20/ Kim, J.-H., Nakano, S., Nakamichi, M.: A novel method to stably secure beryllium resources for fusion blankets. *Journal of Nuclear Materials*, Bd. 542, 15. Dezember 2020.
- /KIM 24/ Kimura, T.: A legal analysis for a future regulatory framework for fusion energy in Japan. *Nuclear Law Bulletin*, Nr. 112, S. 79–109, 2024.
- /KIT 26/ Institut für Astroteilchenphysik (IAP) - Tritiumlabor Karlsruhe (TLK): Das Tritiumlabor Karlsruhe (TLK), des Instituts für Astroteilchenphysik (IAP). Erreichbar unter <https://www.tlk.kit.edu/>, Stand von 2026.
- /KOL 16/ Kolbasov, B. N., Khripunov, V. I., Biryukov, A. Y.: On use of beryllium in fusion reactors: Resources, impurities and necessity of detritiation after irradiation. *Fusion Engineering and Design*, Bd. 109-111, Part A, S. 480–484, DOI 10.1016/j.fusengdes.2016.02.073, 1. November 2016.
- /KON 18/ Kondo, M., Nakajima, Y., Tanaka, T., Norimatsu, T.: Effect of isotope enrichment on performance of lead-lithium blanket of inertial fusion reactor. *Journal of Physics: Conference Series*, Bd. 1090, DOI 10.1088/1742-6596/1090/1/012004, 2018.
- /KUL 22/ Kulesza, J. A., Adams, T. R., Armstrong, J. C., Bolding, S. R., Brown, F. B., Bull, J. S.: MCNP Code Version 6.3.0 Theory & User Manual. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-22-30006, Rev. 1, 28. September 2022.
- /LEP 15/ Leppänen, J.: Serpent - a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code, User's Manual. 18. Juni 2015.
- /LIN 95/ Lindl, J.: Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain. *Physics of Plasmas*, Bd. 2, Nr. 11, S. 3933–4024, DOI 10.1063/1.871025, 1995.

- /LIO 25/ Lion, J., Anglès, J.-C., Bonauer, L., Bañón Navarro, A., Cadena Ceron, S. A., Davies, R., Drevlak, M., Foppiani, N., Geiger, J., Goodman, A., Guo, W., Guiraud, E., Hernández, F., Henneberg, S., et al.: Stellaris: A high-field quasi-isodynamic stellarator for a prototypical fusion power plant. *Fusion Engineering and Design*, Bd. 214, DOI 10.1016/j.fusengdes.2025.114868, 2025.
- /LIS 23/ Lisanti, F., Arena, P., Bonifetto, R., Froio, A., González, F. A. H., Spagnuolo, G. A., Zanino, R.: Modeling the Transport of Activated Corrosion Products in the WCLL PbLi Loop for ITER and the EU DEMO With the GETTHEM Code. *IEEE Access*, Bd. 11, S. 22614–22628, DOI 10.1109/ACCESS.2023.3252905, 2023.
- /LIT 21/ Litnovsky, A., Duran I., Coenen, J. W., Gasparyan, Y., Gilbert, M. R., Hollmann, E., Linsmeier Ch, Nogami, S., Skinner, C. H., Zinkle, S.: Fusion - Reactor Materials. *Encyclopedia of Nuclear Energy*, Bd. 3, S. 594–619, DOI 10.1016/B978-0-12-819725-7.00146-X, 2021.
- /LOA 25/ Loarte, A., Pitts, R. A., Wauters, T., Nunes, I., Vries, P. de, Kim, S. H., Köchl, F., Polevoi, A., Lehnen, M., Artola, J.: The new ITER baseline, research plan and open R&D issues. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, Bd. 67, Nr. 6, DOI 10.1088/1361-6587/add9c9, 2025.
- /LON 11/ Longhurst, G. R., Tsuchiya, K., Dorn, C. H., Folkman, S. L., Fronk, T. H., Ishihara, M., Kawamura, H., Tranter, T. N., Rohe, R., Uchida, M., Vidal, E.: Managing Beryllium in Nuclear Facility Applications. *Nuclear Technology*, Bd. 176, Nr. 3, S. 430–441, DOI 10.13182/NT11-A13318, 2011.
- /LUK 20/ Lukacs, M., Williams, L. G.: Nuclear safety issues for fusion power plants. *Fusion Engineering and Design*, Bd. 150, DOI 10.1016/j.fusengdes.2019.111377, 2020.
- /LUK 21/ Lukacs, M., Williams, L. G.: A sensitivity analysis of the factors that influence the hazard potential of fusion power plants. *Fusion Engineering and Design*, Bd. 164, DOI 10.1016/j.fusengdes.2020.112183, März 2021.

- /MAR 25/ Martínez-Albertos, P., Sauvan, P., Catalán, J. P., Belotti, M., Javier, F., Germa, J., Le Tonqueze, Y., Dammann, A., Juárez, R.: Optimizing Radiation Shielding for Fusion Maintenance Facilities: Insights From a Comprehensive Analysis of ITER Hot Cell. *International Journal of Energy Research*, Nr. 1, DOI 10.1155/er/9222155, 2025.
- /MER 07/ Merrill, B. J.: Recent Updates to the MELCOR 1.8.2 Code for ITER Applications. US Department of Energy (DOE), Office of Science Education and Technical Information, Idaho National Laboratory (INL), INL/EXT-07-12493: Idaho, April 2007.
- /MER 19a/ Mertens, M. A. J., Fischer, U., Pereslavitsev, P., Stieglitz, R., Noterdaeme Jean-Marie, Cottenier, S.: Po-210 production in the European DEMO fusion reactor. *Nuclear Fusion*, Bd. 59, Nr. 10, DOI 10.1088/1741-4326/ab36aa, August 2019.
- /MER 19b/ Mertens, M. A. J.: Die Produktion und die molekularen Erscheinungsformen von radiotoxischem Po-210 in Kernfusions- und Kernspaltungsreaktoren. Ghent University, Faculty of Engineering and Architecture, ISBN 978-94-6355-302-5, 2019.
- /MOT 12/ Motzkus, K.-H., Häusler, U., Dollan, D.: Wissenswertes über Hochradioaktive Strahlenquellen. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Fachbereich Strahlenschutz und Gesundheit, BfS-SG-17/12, November 2012.
- /MPI 25/ Max-Planck-Institut für Plasmaphysik: Wendelstein 7-X erreicht neue Bestwerte [UPDATE]. Stand vom 3. Juni 2025, erreichbar unter <https://www.ipp.mpg.de/5532474/w7x>, 2025.
- /NAK 14/ Nakamura, M., Tobita, K., Gulden, W., Watanabe, K., Someya, Y., Tanigawa, H., Sakamoto, Y., Araki, T., Matsumiya, H., Ishii, K., Utoh, H., Takase, H., Hayashi, T., Satou, A., et al.: Study of safety features and accident scenarios in a fusion DEMO reactor. *Fusion Engineering and Design*, Bd. 89, Nr. Issues 9-10, S. 2028–2032, DOI 10.1016/j.fusengdes.2014.04.062, Oktober 2014.

- /NIC 24/ Nicola, J. D., Suratwala, T., Pelz L., Heebner, J., Aden, R., Alessi, D., Amula, S., Barnes, A., Bhasker, A., Bond, T., Bude, J., Buckley, B., Browning, D., Cabral, J., et al.: Delivering laser performance conditions to enable fusion ignition, and beyond at the National Ignition Facility. High Energy Density Physics, Bd. 52, DOI 10.1016/j.hedp.2024.101130, September 2024.
- /NRC 13/ Panel on the Assessment of Inertial Confinement Fusion Targets, Board on Physics and Astronomy, Board on Energy and Environmental Systems, Division on Engineering and Physical Sciences, National Research Council: Assessment of Inertial Confinement Fusion Targets, p. 37. ISBN 978-0-309-27062-5, DOI 10.17226/18288, National Academies Press: Washington, D.C., 2013.
- /NRC 24/ Office of Nuclear Material Safety and Safeguards (NMSS) (Hrsg.): Consolidated Guidance About Materials Licenses, Program-Specific Guidance About Possession Licenses for Fusion Machines. US Nuclear Regulatory Commission (NRC), NUREG-1556, 2024.
- /OECD 20/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA): Revised Exposé des motifs of the Paris Convention as amended by the Protocols of 1964, 1982 and 2004, para. 18(e). NEA/NLC/DOC(2020)1: Paris, 2020.
- /PAR 21/ Park, J. H., Pereslavytsev, P.: Comparative activation analyses for the HCPB breeding blanket in DEMO. Fusion Engineering and Design, Bd. 167, DOI 10.1016/j.fusengdes.2021.112338, Juni 2021.
- /PAS 21/ Paschalidis, K.: Metallic dust transport simulations for ITER and DEMO. Degree Project in Electrical Engineering Second Cycle 30 Credits, School of Electrical Engineering and Computer Science, KTH Royal Institute of Technology: Stockholm, 2021.
- /PEA 18/ 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, Bd. 136, S. 1140–1148, DOI 10.1016/j.fusengdes.2018.04.090, 2018.

- /PEI 10/ Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J.: VSG: Abfallspezifikation und Mengengerüst - Basis der Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke (September 2019) AP 3, Bericht zum Arbeitspaket 3 der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG). GRS, GRS 274, September 2010.
- /PEI 11/ Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J.: Abfallspezifikation und Mengengerüst, Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung, Bericht zum Arbeitspaket 3; Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, ISTec, nse, GRS, GRS-278, Juli 2011.
- /PER 16/ Perrault, D.: Safety issues to be taken into account in designing future nuclear fusion facilities. Fusion Engineering and Design, Bd. 109-111, S. 1733–1738, DOI 10.1016/j.fusengdes.2015.10.012, 2016.
- /PIN 17/ Pinna, T., Carloni, D., Carpignano, A., Ciattaglia, S., Johnston, J., Porfiri, M. T., Savoldi, L., Taylor, N., Sobrero, G., Ugenti, A. C., Vaisnoras, M., Zanino, R.: Identification of accident sequences for the DEMO plant. Fusion Engineering and Design, Bd. 124, S. 1277–1280, DOI 10.1016/j.fusengdes.2017.02.026, 2017.
- /POL 25/ Polyanskii, M.: Safety Regulation of Fusion Facilities in the Russian Federation. Präsentation, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (SEC NRS), Moskau, International Atomic Energy Agency (IAEA) Fusion Energy Conference: Tianfu International Convention Center, Chengdu, 17. Oktober 2025.
- /RAE 16/ Raeder, J., Weller, A., Wolf, R., Jin, X. Z., Boccaccini, Lorenzo V., Stieglitz, Robert, Carloni, D., Pistner, C., Herb, J.: Review of the safety concept for fusion reactor concepts and transferability of the nuclear fission regulation to potential fusion power plants. GRS, GRS-389, 97 S., ISBN 9783944161709: Köln, Januar 2016.

- /RAS 00/ Raskob, W., Hasemann, I., Di Pace, L.: Final documentation on dose assessments for three potential European ITER candidate sites with updated source terms from ITER NSSR-2. Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt, Wissenschaftliche Berichte, FZKA 6404, DOI 10.5445/IR/270047359, Karlsruhe, 2000.
- /RAS 26/ Raskob, W., Hasemann, I., Schichtel, T., Ottenburger, S.: Dose to the population from unit releases of tritium and activation products in EU DEMO. Fusion Engineering and Design, Bd. 230, DOI 10.1016/j.fusengdes.2026.115889, September 2026.
- /RÄT 20/ Rätty, A., Häkkinen, S., Kotiluoto, P.: Nuclide inventory of FIR1 TRIGA research reactor fuel. Annals of Nuclear Energy, Bd. 141, DOI 10.1016/j.anucene.2020.107352, 15. Juni 2020.
- /REY 16/ Reyes, S., Anklam, T., Meier, W., Campbell, P., Babineau, D., Becnel, J., Taylor, C., Coons, J.: Recent developments in IFE safety and tritium research and considerations for future nuclear fusion facilities. Fusion Engineering and Design, Bd. 109-111, Part A, S. 175–181, DOI 10.1016/j.fusengdes.2016.03.034, 1. November 2016.
- /ROM 15/ Romano, P. K., Horelik, Nicholas, E., Herman, B. R., Nelson, A. G., Forget, B., Smith, K.: OpenMC: A state-of-the-art Monte Carlo code for research and development. Annals of Nuclear Energy, Bd. 82, S. 90–97, August 2015.
- /ROM 19/ Romazanov, J., Eksaeva, A., Kirschner, A., Borodin, D., Brezinsek, S., Brömmel, D., Steinbusch, B., Gibbon, P., Linsmeier, C.: ERO2.0, a massively parallel Monte-Carlo code for plasma-wall interaction and global impurity transport modeling in fusion devices. Jülich Forschungszentrum, 2019.
- /ROS 24/ Rosanvallon, S., Kanth, P., Elbez-Uzan, J.: Waste management strategy for EU DEMO: Status, challenges and perspectives. Fusion Engineering and Design, Bd. 202, DOI 10.1016/j.fusengdes.2024.114307, Mai 2024.

- /RUH 22/ Ruhl, H., Korn, G.: A non-thermal laser-driven mixed fuel nuclear fusion reactor concept. Hrsg.: Cornell University (arXiv), DOI 10.48550/arXiv.2202.03170, erreichbar unter <https://arxiv.org/pdf/2202.03170>, Stand von 2022.
- /RUI 22/ Ruiz, F. O., Theis, C., Porras, I., Vincke, H.: SOLIDUSS: Solid-state diffusion software for radiation protection. Applied Radiation and Isotopes, Bd. 179, Januar 2022.
- /SAU 26/ Sauter, P.: Fusion Energy in Nuclear Weapons Law, Tackling the Climate Crisis while Addressing the Risk of Further Proliferation. Beiträge zum ausländischen öffentlichen Recht und Völkerrecht, Bd. 348, 1. Aufl., ISBN 978-3-7560-3561-8, DOI 10.5771/9783748966210, Nomos: Baden-Baden, 2026.
- /SCA 95/ Scaffidi-Argentina, F.: Modellierung des Schwellens und der Tritium-Freisetzung von bestrahltem Beryllium. Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt, Wissenschaftliche Berichte, FZKA 5632: Karlsruhe, Oktober 1995.
- /SCH 18/ Schmid, K., Lunt, T.: 3D global impurity transport modeling with WalldYN and EMC3-Eirene. Nuclear Materials and Energy, Bd. 17, S. 200–205, DOI 10.1016/j.nme.2018.11.005, Dezember 2018.
- /SCH 22/ Schwenzer, J. C., Day, C., Giegerich, T., Santucci, A.: Operational Tritium Inventories in the EU-DEMO Fuel Cycle. Fusion Science and Technology, Bd. 78, Issue 8, S. 664–675, DOI 10.1080/15361055.2022.2101834, 2022.
- /SHI 24/ Shimada, M., Simon, P.-C. A., Icenhour, C. T., Singh, G.: Toward a high-fidelity tritium transport modeling for retention and permeation experiments. Fusion Engineering and Design, Bd. 203, DOI 10.1016/j.fuseng-des.2024.114438, Juni 2024.

- /SIM 25/ Simon, P.-C. A., Icenhour, C. T., Singh, G., Lindsay, A. D., Bhave, C., Yang, L., Riet, A., Che, Y., Humrickhouse, P., Calderoni, P., Shimada, M.: MOOSE-based Tritium Migration Analysis Program, Version 8 (TMAP8) for advanced open-source tritium transport and fuel cycle modeling. *Fusion Engineering and Design*, Bd. 214, DOI 10.1016/j.fusengdes.2025.114874, Mai 2025.
- /SSK 02/ Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Leitfaden für den Fachberater Strahlenschutz der Katastrophenleitung bei kerntechnischen Notfällen. *Berichte der Strahlenschutzkommission*, Nr. 37, Dezember 2002.
- /TAY 14/ Taylor, N., Cortes, P.: Lessons learnt from ITER safety & licensing for DEMO and future nuclear fusion facilities. *Fusion Engineering and Design*, Bd. 89, Nr. Issues 9-10, S. 1995–2000, DOI 10.1016/j.fusengdes.2013.12.030, Oktober 2014.
- /TER 22/ Terranova, N., Breidokaité, S., Contessa, G. M., Di Pace, L., Gasparrini, C., Kaliatka, T., Mariano, G.: Activated Corrosion products Evaluations for Occupational Dose Mitigation in Nuclear Fusion Facilities. *Environments*, Bd. 9, Nr. 7, DOI 10.3390/environments9070076, 2022.
- /TON 23/ Tonhauser, W., Olajos, K. T.: Nuclear fusion: Legal aspects. *Nuclear Law Bulletin*, Bd. 111, Nr. 2, S. 57–74, 2023.
- /TRA 26/ Travleev, A.: Anwendung numerischer Verfahren in Bezug auf sicherheitstechnisch relevante radiologische Aspekte bei der Handhabung und Lagerung bestrahlter Forschungsreaktor-Brennelemente und Komponenten. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, wird veröffentlicht werden, 2026.
- /UCC 16/ Uccello, A., Gervasini, G., Ghezzi, F., Lazzaro, E., Bacharis, M., Flanagan, J., Matthews, G., Järvinen, A., Sertoli, M.: Comparison of dust transport modelling codes in a tokamak plasma. *Physics of Plasmas*, Bd. 23, Issue 10, DOI 10.1063/1.4964672, Oktober 2016.

/UKAEA 21/ Bailey, G., Foster, D., Kanth, P., Gilbert, M.: The FISPACT-II User Manual. United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA), Culham Science Centre, UKAEA-CCFE-RE(21)02, Mai 2021.

/ULL 09/ Ullah, S., Awan, S. E., Mirza, N. M., Mirza, S. M.: Modeling and simulation of release of radioactivity from a typical MTR type research reactor under accidental conditions. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009.

/WAN 25/ Wang, D.: Radiation Safety Regulation of Fusion Facilities in China. Präsentation, International Atomic Energy Agency (IAEA), International Atomic Energy Agency (IAEA) Technical Meeting on Design Safety, Safety Assessment and Regulatory Activities to Facilitate Further Development and Future Deployment of Fusion Facilities: Granada, 2. - 6. Juni 2025.

/WEL 15/ Welte, S., Besserer, U., Osenberg, D., Wendel, J.: Tritium Laboratory Karlsruhe: Administrative and Technical Framework for Isotope Laboratory Operation. Fusion Science and Technology, Bd. 67, Nr. 3, S. 635–638, DOI 10.13182/FST14-T98, 2015.

/WEN 17/ Wenninger, R., Albanese, R., Ambrosino, R., Arbeiter, F., Aubert, J., Bachmann, C., Barbato, L., Barrett, T., Beckers, M., Biel, W.: The DEMO wall load challenge. Nuclear Fusion, Bd. 57, DOI 10.1088/1741-4326/aa4fb4, 2017.

/WUR 25/ Wurzel, S. E., Scott, C. H.: Continuing progress toward fusion energy breakeven and gain as measured against the Lawson criteria. Physics of Plasmas, Bd. 2025, Nr. 11, DOI 10.1063/5.0297357, 2025.



## **Abbildungsverzeichnis**

|          |                                                                                                                                              |     |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abb. 3.1 | Aufbau der deutschen Strahlenschutzregulierung.....                                                                                          | 15  |
| Abb. 5.1 | Vergleich radioaktiver Inventare von Anlagen unter Strahlenschutz<br>bzw. Kerntechnikregulierung mit Literaturwerten für Fusionsanlagen..... | 64  |
| Abb. 6.1 | Sicherheitsanalyse – End-to-End Workflow .....                                                                                               | 87  |
| Abb. 7.1 | Vorschlag für Stufung des technischen Regelwerks und mögliche<br>Regelwerksuntersetzungen .....                                              | 103 |



## Tabellenverzeichnis

|          |                                                                                                       |    |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tab. 4.1 | Vergleich des deutschen und französischen Strahlenschutz- und Atomrechts .....                        | 45 |
| Tab. 5.1 | In EU DEMO freisetzbare Energien /CAR 22/ .....                                                       | 60 |
| Tab. 5.2 | Für Entsorgung relevante Radionuklide und ihre Halbwertszeiten .....                                  | 68 |
| Tab. 5.3 | Im Endlager l'Aube akzeptierte spezifische Aktivitäten in schwachradioaktiven Abfällen /ROS 24/ ..... | 75 |



## Abkürzungsverzeichnis

|           |                                                                                                                                                   |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ACP       | Activated Corrosion Product (aktivierte Korrosionsprodukte, die hauptsächlich in wassergekühlten Blanketkonzepten oder Divertoren erzeugt werden) |
| AMF       | Active maintenance facility                                                                                                                       |
| ANFIBE    | Analysis of Fusion Irradiated Beryllium (vom FzK entwickelter Code zur Berechnung des Verhaltens von Beryllium unter Strahlungseinfluss)          |
| ARC       | Affordable, robust, compact                                                                                                                       |
| Art       | Artikel                                                                                                                                           |
| ARTM      | Atmosphärisches Radionuklid-Transportmodell                                                                                                       |
| ASTEC     | Accident Source Term Evaluation Code (fr. Integralcode in der Kerntechnik)                                                                        |
| AtDeckV   | Verordnung über die Deckungsvorsorge nach dem Atomgesetz                                                                                          |
| ATHLET    | Analyse der Themohydraulik von Lecks und Transienten (dt. Themohydraulik-Code aus der Kerntechnik)                                                |
| ATHLET-CD | ATHLET + Code Degradation (Erweiterung von ATHLET um die Kernzerstörung und Freisetzung von Radionukliden)                                        |
| ALARA     | As Low As Reasonably Achievable (grundsätzliche Handlungsmaxime im Strahlenschutz)                                                                |
| ALARP     | As low as reasonably practicable                                                                                                                  |
| AtG       | Atomgesetz                                                                                                                                        |
| ASDEX     | axialsymmetrisches Divertor-Experiment (Tokamak-Experimentalanlage des IPP des Garching Forschungszentrums)                                       |
| ASNR      | Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (französische kerntechnische Aufsichtsbehörde)                                                 |
| AtEV      | Atomrechtliche Entsorgungsverordnung                                                                                                              |
| AVV       | Allgemeine Verwaltungsvorschrift                                                                                                                  |
| BAFA      | Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle                                                                                                     |
| BAnz      | Bundesanzeiger                                                                                                                                    |
| BASE      | Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung                                                                                             |
| BauGB     | Baugesetzbuch                                                                                                                                     |
| BfS       | Bundesamt für Strahlenschutz                                                                                                                      |
| BGBI      | Bundesgesetzblatt                                                                                                                                 |
| BImSchG   | Bundes-Immissionsschutzgesetz                                                                                                                     |

|               |                                                                                                                                                                                                     |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Blanket       | innere Auskleidung der Plasmakammer mit den Funktionen:<br>1. Wärmeerzeugung aus Neutronenenergie<br>2. Erbrüten von Tritium<br>3. Abschirmen der Betriebsräume von Neutronen- und Röntgenstrahlung |
| BMFTR         | Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt                                                                                                                                          |
| BMUB          | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit                                                                                                                                |
| BMUKN         | Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit                                                                                                                      |
| BMUV          | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz                                                                                                                |
| CANDU         | Canadian Deuterium Uranium (kanadischer Schwerwasserreaktor)                                                                                                                                        |
| CCI           | Core-Concrete Interaction (MCCI-Modul in COCOSYS)                                                                                                                                                   |
| CEA           | Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives                                                                                                                                      |
| CEN           | Comité Européen de Normalisation                                                                                                                                                                    |
| CERES         | Codes d'Evaluations Rapides Environnementales et Sanitaires                                                                                                                                         |
| CFS           | Commonwealth Fusion Systems                                                                                                                                                                         |
| CFR           | Code of Federal Regulations (USA)                                                                                                                                                                   |
| CIS           | Control Interlock System (System zur Begrenzung der Plasma-Parameter in ITER)                                                                                                                       |
| COCOSYS       | Containment Code System (dt. Containment-Code aus der Kerntechnik)                                                                                                                                  |
| CSA           | Centre de stockage de l'Aube                                                                                                                                                                        |
| CSS           | Central Safety System (System zum Schnellabschalten des Plasmas in ITER)                                                                                                                            |
| CTEM-CLASS-TT | Canadian Land Surface Scheme and Canadian Terrestrial Ecosystem Model                                                                                                                               |
| CV            | Control Volume (Kontrollvolumen in einem lumped parameter Code)                                                                                                                                     |
| DBA           | Design Base Accident (Auslegungsstörfall)                                                                                                                                                           |
| D-D           | Deuteron-Deuteron-Fusionsreaktion                                                                                                                                                                   |
| DEMO          | Demonstration Power Plant (Kraftwerkskonzept zur Demonstration eines wirtschaftlichen Betriebes von Fusionskraftwerken)                                                                             |
| DIN           | Deutsches Institut für Normung                                                                                                                                                                      |
| DIPCOT        | Dispersion over Complex Terrain (Ausbreitungsmodell für Radionuklide über komplexem Gelände)                                                                                                        |
| DWR           | Druckwasserreaktor                                                                                                                                                                                  |
| D-T           | Deuteron-Triton-Fusionsreaktion                                                                                                                                                                     |
| ECRH          | Electron Cyclotron Resonance Heating                                                                                                                                                                |

|            |                                                                                                                                                                               |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| EdF        | Electricité de France (französischer Energieversorger)                                                                                                                        |
| ELM        | Edge-Localized-Modes                                                                                                                                                          |
| EN         | Europäische Norm                                                                                                                                                              |
| EPR        | Environmental Permitting Regulations                                                                                                                                          |
| ESK        | Entsorgungskommission                                                                                                                                                         |
| EU         | Europäische Union                                                                                                                                                             |
| Euratom    | Europäischen Atomgemeinschaft                                                                                                                                                 |
| EUROfusion | European Consortium for the Development of Fusion Energy                                                                                                                      |
| EVITA      | European Vacuum Impingement Test Apparatus (Experiment zur Untersuchung von Leckstörfällen unter kryogenen Bedingungen für ITER)                                              |
| EW         | exempt waste                                                                                                                                                                  |
| FELEX      | International Group of Legal Experts on Fusion Energy                                                                                                                         |
| FIPREM     | Fission Product Release Module (Code zur Berechnung der Radionuklidfreisetzung aus dem Brennstoff, Teil von ATHLET-CD)                                                        |
| FISPACT    | Fission Product Activation                                                                                                                                                    |
| FMEA       | Failure Mode and Effects Analysis                                                                                                                                             |
| FusionsG   | Fusionsgesetz                                                                                                                                                                 |
| FUTURE     | Fuel Transient Ultimate Response (ein am Europäischen Institut für Transurane in Karlsruhe entwickelte Programm zur Berechnung des zeitlichen Verhaltens von LWR-Brennstäben) |
| FW         | First Wall (erste Wand in der Auskleidung [Blanket] der Plasmakammer)                                                                                                         |
| FwDV       | Feuerwerkdienstvorschrift                                                                                                                                                     |
| GETTHEM    | General Tokamak Thermal-hydraulic Model;                                                                                                                                      |
| GG         | Grundgesetz                                                                                                                                                                   |
| GMBI       | Gemeinsame Ministerialblatt                                                                                                                                                   |
| GRS        | Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH                                                                                                                   |
| GSG        | General Safety Guide                                                                                                                                                          |
| GSR        | General Safety Requirements                                                                                                                                                   |
| GTCC       | Greater than class C                                                                                                                                                          |
| HCPB       | Helium-cooled Pebble Bed (Brutblanketkonzept vom KIT für den EU DEMO)                                                                                                         |
| HLW        | High Level Waste                                                                                                                                                              |
| HRQ        | Hochradioaktive Quelle                                                                                                                                                        |
| HTS        | High Temperature Superconductors (Hochtemperatursupraleiter)                                                                                                                  |
| IAEA       | International Atomic Energy Agency (Internationale Atomenergie-Agentur)                                                                                                       |

|         |                                                                                                       |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ICE     | Ingress of Coolant Event (Experimentalanlage zur Abbildung des Druckabbausystems von ITER)            |
| ICF     | Inertial confinement fusion, Trägheits- bzw. meist Laserfusion                                        |
| ICPE    | Installation classée pour la protection de l'environnement                                            |
| ICRH    | Ion Cyclotron Resonance Heating                                                                       |
| IEC     | International Electrotechnical Commission                                                             |
| ILW     | Intermediate Level Waste                                                                              |
| INB     | installation nucléaire de base                                                                        |
| INES    | International Nuclear and Radiological Event Scale                                                    |
| INFCIRC | Information Circular (der IAEA)                                                                       |
| INL     | Idaho National Laboratory (US-am. Nationales Forschungszentrum)                                       |
| IRR     | Ionising Radiations Regulations                                                                       |
| ISO     | International Organization for Standardization                                                        |
| ITER    | International Thermonuclear Experimental Reactor, bzw.: lat. Weg                                      |
| ITER IO | ITER Organization                                                                                     |
| IVC     | In Vessel Components                                                                                  |
| JET     | Joint European Torus (bisher größte Fusionsanlage mit DT-Betrieb in Culham, England)                  |
| JT-60SA | Advanced Superconducting Tokamak (Japan Torus)                                                        |
| KALOS   | Karlsruhe Lithium Orthosilicate (Brutmaterial des HCPB-Brutblanketkonzeptes vom KIT)                  |
| KATRIN  | Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment                                                                 |
| KIT     | Karlsruher Institut für Technologie                                                                   |
| KTA     | Kerntechnische Ausschuss                                                                              |
| LAGuS   | Landesamt für Gesundheit und Soziales                                                                 |
| LHC     | Large Hadron Collider (Europäischer Speicherring am CERN in Genf)                                     |
| LLNL    | Lawrence Livermore National Laboratories                                                              |
| LLW     | Low Level Waste                                                                                       |
| LMJ     | Laser Mégajoule                                                                                       |
| LTS     | Low Temperature Superconductors (Tieftemperatursupraleiter)                                           |
| MA-VL   | Mittelradioaktive Abfälle mit langen Halbwertszeiten                                                  |
| MCF     | Magnetic confinement fusion, Magnetfusion bzw. Konzept mit magnetisch eingeschlossenen Fusionsplasmen |
| MCNP    | Monte-Carlo N-particle (Neutronentransport-Code)                                                      |
| MD      | Major Disruption (Plasmakollaps in einem Tokamak)                                                     |
| MDF     | Materials Detritiation Facility                                                                       |

|          |                                                                                                           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| MELCOR   | Methods for Estimation of Leakages and Consequences of Releases (US-am. Integralcode aus der Kerntechnik) |
| MGI      | Massive Gas Injection (Abschaltvorrichtung für das Fusionsplasma)                                         |
| MLD      | Master Logic Diagram                                                                                      |
| MOOSE    | Multiphysics Object Oriented Simulation Environment                                                       |
| MPIL     | Max-Planck-Institut für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht                                  |
| NA       | DIN-Normenausschuss                                                                                       |
| NaPro    | Nationales Entsorgungsprogramm                                                                            |
| NAW      | Non-Active Waste (Abfallklassifizierung)                                                                  |
| NBI      | Neutral Beam Injection                                                                                    |
| NIF      | National Ignition Facility                                                                                |
| NPT      | Nichtverbreitungsvertrag                                                                                  |
| NRA      | Japanische Nuklearregulierungsbehörde                                                                     |
| NRC      | U. S. Nuclear Regulatory Commission                                                                       |
| NSG      | Nuclear Suppliers Group                                                                                   |
| NUREG    | Nuclear Regulatory Commission (Report)                                                                    |
| OBT      | Organic-bound Tritium (organisch gebundenes Tritium)                                                      |
| OECD     | Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung                                           |
| OECD/NEA | OECD Nuclear Energy Agency                                                                                |
| ÖI       | Öko-Institut e.V.                                                                                         |
| ONR      | Office for Nuclear Regulation                                                                             |
| ORIGEN   | Oak Ridge Isotope Generation Code                                                                         |
| OSCAR    | Outil de Simulation de la Contamination en Réacteur in French                                             |
| PCS      | Plasma Control System (betriebliche Regelung der Plasmaparameter in ITER)                                 |
| PHTS     | Primary Heat Transfer System (primäres Kühlsystem z. B. des Blankets oder des Divertors)                  |
| PIE      | Postulated Initiating Event, Auslösende Ereignisse                                                        |
| ReFus    | Pilotprojekt zur Regulatorik für Fusionsanlagen                                                           |
| REI      | Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen                               |
| RdSchr.  | Rundschreiben                                                                                             |
| RODOS    | Realtime Online Decision Support System ()                                                                |
| RS       | Rundschreiben                                                                                             |
| RSK      | Reaktorsicherheitskommission                                                                              |

|          |                                                                                          |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| SDDR     | Shutdown dose rates                                                                      |
| SEWD     | Störmaßnahmen und sonstige Einwirkungen Dritter                                          |
| SIC      | Safety Important Component                                                               |
| SNF      | Spent nuclear fuel                                                                       |
| SOLIDUSS | SOLID-state diffUSion Software (Code zur Diffusion von Nukliden in Festkörpern)          |
| SOLVEG   | Soil Vegetation                                                                          |
| SPARC    | Smallest Possible ARC                                                                    |
| SSK      | Strahlenschutzkommission                                                                 |
| SSR      | Specific Safety Requirements                                                             |
| StandAG  | Standortauswahlgesetz                                                                    |
| STCP     | Source Term Code Package (US-am. Integralcode aus der Kerntechnik, Vorgänger von MELCOR) |
| STEP     | Spherical Tokamak for Energy Production (DEMO-Konzept in UK)                             |
| StGB     | Strafgesetzbuch                                                                          |
| StrlSchG | Strahlenschutzgesetz                                                                     |
| StrlSchV | Strahlenschutzverordnung                                                                 |
| TBR      | Tritium Breeding Ratio                                                                   |
| TCWS     | Tokamak-Kühlsystem                                                                       |
| TMAP     | Tritium Migration Analysis Program (Tritium-Migrationscode vom INL)                      |
| TQ       | Thermal Quench (Abkühlung des Plasmas, erste Phase einer MD [siehe dort])                |
| TRU      | Transuranic                                                                              |
| TÜV      | Technischer Überwachungsverein                                                           |
| UFOTRI   | Unfallfolgenmodell für Tritiumfreisetzungen                                              |
| UK       | United Kingdom/Vereinigtes Königreich                                                    |
| UKAEA    | United Kingdom Atomic Energy Authority                                                   |
| US/USA   | Vereinigte Staaten von Amerika                                                           |
| UVP      | Umweltverträglichkeitsprüfung                                                            |
| UVPG     | Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung                                            |
| VDI TZ   | VDI Technologiezentrum GmbH                                                              |
| VENTINA  | Versatile Numerical Tool for Inventory and Activation Calculation                        |
| VLLW     | Very Low Level Waste                                                                     |
| VSLW     | Very short lived waste                                                                   |
| VV       | Vacuum vessel (Vakuumgefäß, Vakuumbehälter)                                              |

|         |                                                                                      |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| W7-X    | Wendelstein 7-X (experimenteller Stellarator in Greifswald)                          |
| WALLDYN | Wall Dynamics (Code zur Simulation von Staubgenese und Transport)                    |
| WCLL    | Water Cooled Lithium Lead Breeding Blanket (Blanket-Konzept)                         |
| WEST    | W Environment in Steady State Tokamak (Tungsten Environment in Steady State Tokamak) |



## A Poster

Im Rahmen des Projektworkshops wurden vier Poster präsentiert, die sich detaillierter mit sicherheitsrelevanten Themen beschäftigten.

### Pilotvorhaben zur Regulatorik für Fusionsanlagen (ReFus)

## Entstehung und Transport von aktiviertem Wolframstaub im Normalbetrieb und unter Unfallbedingungen

### Wolfram in Fusionsanlagen

Eigenschaften wie ein hoher Schmelzpunkt ( $>3.400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), extreme **Hitzebeständigkeit** und geringe Sputter-Raten machen Wolfram zu einem idealen Material für **plasma-belastete Wandkomponenten** in Fusionsreaktoren. Anlagen wie ASDEX Upgrade (AUG), WEST, EAST und ITER nutzen Wolfram bereits als alleiniges Wandmaterial; für CFETR und EU-DEMO wird das Konzept ebenfalls in Betracht gezogen.

Wolfram kann durch Neutronenbestrahlung **aktiviert** werden; mobiler, radioaktiver Wolframstaub kann etwa durch Plasma-Wand-Wechselwirkungen entstehen.

(Tabelle aus [1], auf Grundlage von Neutronenaktivierungsrechnungen; Betrachtung für ITER).

Aktivierter Wolframstaub kann unter bestimmten Unfallbedingungen in relevantem Maß mobilisiert werden.

**Unfallspezifische Quellterme** sowie Eigenschaften des aktivierten Wolframstaubes sind derzeit Gegenstand aktueller Forschung, da sie für die **Auswirkungen auf Mensch und Umwelt** von erheblicher Relevanz sind.

### Entstehung von aktiviertem Wolframstaub

Wolframstaub kann durch verschiedene Prozesse während des **Betriebs** entstehen (z. B. Sputtering, Mikrolichtbögen), sowie als Folge von **transienten Ereignissen** (z. B. Disruptionen).

Zur Untersuchung der **Staub erzeugungsraten** wurden z. B. in [2] Videoanalysen von AUG zu verschiedenen transienten Ereignissen untersucht, darunter Disruption, Typ-I-Edge-Localized-Modes und L-Mode-Entladungen.

Insgesamt wird die W-Staubmenge für Tokamaks mit bis zu ca. 1000 kg abgeschätzt. [3]

Im Allgemeinen wird die Stauberzeugungsrate durch Faktoren wie **Betriebsleistung-** und **-dauer**, **Häufigkeit von transienten Ereignissen** und verschiedenen Konstruktionsparametern bestimmt.

| Activated tungsten dust |               |
|-------------------------|---------------|
| Nuclide                 | Activity Bq/g |
| Co-60                   | 1.27E+06      |
| Ta-179                  | 2.74E+7       |
| Ta-182                  | 1.67E+8       |
| Ta-182m                 | 2.89E+7       |
| Ta-183                  | 6.40E+7       |
| Ta-184                  | 4.33E+7       |
| Ta-186                  | 6.40E+7       |
| W-179                   | 2.56E+8       |
| W-179m                  | 1.02E+8       |
| W-181                   | 1.43E+10      |
| W-185                   | 3.72E+10      |
| W-185m                  | 3.68E+10      |
| W-187                   | 1.04E+11      |
| Re-184                  | 1.99E+7       |
| Re-186                  | 1.97E+9       |
| Re-188                  | 1.19E+9       |
| Re-188m                 | 1.15E+8       |

### Eigenschaften Wolframstaub: Größe und Morphologie

Die Eigenschaften des Wolframstaubs bestimmen sein Verhalten im Ereignisfall und mögliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt.

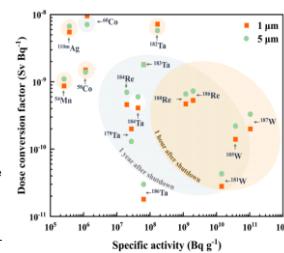
**Größe:** Einige hundert Nanometer bis zu einigen zehn Mikrometern [3]. Eine Größenverteilung wurde z. B. an AUG dokumentiert [4].

**Morphologie:** Die Morphologie (sphärisch, porös, in Agglomeraten) beeinflusst die Wechselwirkung mit dem Plasma (Wärmeableitung, Materialerosion) sowie den Einfang von Tritium.

Die Menge an **Tritium in Stäuben** ist derzeit noch mit großen Unsicherheiten behaftet [3].

Die spezifische Aktivität von aktiviertem Wolframstaub unter einer Fluenz von  $0,13\text{ MWa m}^{-2}$  (ITER) nach Plasmaabschaltung; interner Bestrahlungsdosis-Umrechnungsfaktor für eingeatmeten Staub gemäß ICRP-Publikation 119.

Staub mit unterschiedlichen Größen hat unterschiedliche Lungen-Blut-Umrechnungsfaktoren (1 und  $5\text{ }\mu\text{m}$ : mögliche Größenverteilung des aktivierten Staubs aus ITER. Graphik aus [5].



### Mögliche Freisetzungspfade von aktiviertem Wolframstaub

Während der **Wartung** wird aktivierter Staub nah an seinem Entstehungsort aufgefangen. HEPA-Filter des Lüftungssystems sorgen für eine Abscheidung von Schwebstoffen/Stäuben. Bei **Störfällen** wie Kühlmittelverlust, Vakuumverlust oder Verlust der Wärmesenke kann aktivierter Wolframstaub wegen der Druckbeaufschlagung im Vakuumgefäß (durch Eintritt von Kühlmittel) in die Anlage transportiert und in die Umgebung freigesetzt werden.

### Literatur

- [1] Taylor, N., Raskob, W., 2007. Updated accident consequence analyses for ITER at Cadarache
- [2] Brochard, F. et al., 2017. Video analysis of dust events in full-tungsten ASDEX Upgrade
- [3] Grisolia, C. et al., 2019. Current investigations on irradiated dust and their impact on tokamak safety
- [4] Endersbacher, N. et al., 2011. Comparative study of the dust particle populations sampled during four consecutive campaigns in full-tungsten ASDEX Upgrade
- [5] Wang, Y. et al., 2024. Emerging activated tungsten dust: Source, environmental behaviors, health effects

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt im Rahmen des Programms FUSION 2040 – Forschung auf dem Weg zum Fusionskraftwerk (Vertragsnummer 13F1002A) gefördert.

Gefördert durch:



## Metrik zum Vergleich radiologischer Gefährdungspotentiale

### Anforderungen an Metrik

- Vergleich des Gefährdungspotentials verschiedener Anlagen
  - Strahlenschutz (Strahlenquellen, Beschleuniger, ...)
  - Kernspaltung, Fusion
  - Stark unterschiedliche Aktivitäten
  - Unterschiedliche Nuklide (damit Dosiskoeffizienten, Halbwertszeiten)
- Berücksichtigung des etablierten Vorgehens im Strahlenschutz
- Mögliche Entscheidungsgrundlage für einen gestuften Ansatz in der Nachweisführung/Nachweismethoden im Genehmigungsverfahren
- Soll keine komplexe Analysemethoden benötigen

### Definition

Summe des Verhältnisses der Aktivität jedes Nuklids zur Freigrenze gemäß StrlSchV

### Hintergrundinformation

Freigrenzen geben an, bis zu welcher Aktivität der Umgang mit dem jeweiligen Nuklid genehmigungsfrei ist (Dosis bei Referenzszenarien  $< 10 \mu\text{Sv}$ ) [1]

### Einschränkungen

- Sind die Szenarien zur Herleitung der Freigrenzen übertragbar auf Szenarien bei der Berechnung des Störfallplanungswertes?
- Keine Modellierung der Mobilisierbarkeit/des Transports des Inventars

### Beispiele für Inventare

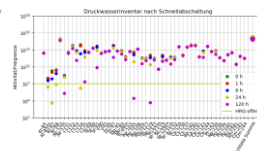
#### Strahlenschutz

- Hochradioaktiv umschlossene Strahlenquellen



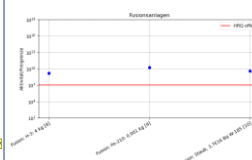
#### Kernspaltung

- Druckwasserreaktor (DWR)
- Forschungsreaktoren
- Abgebrannter Brennstoff in Castorbehälter

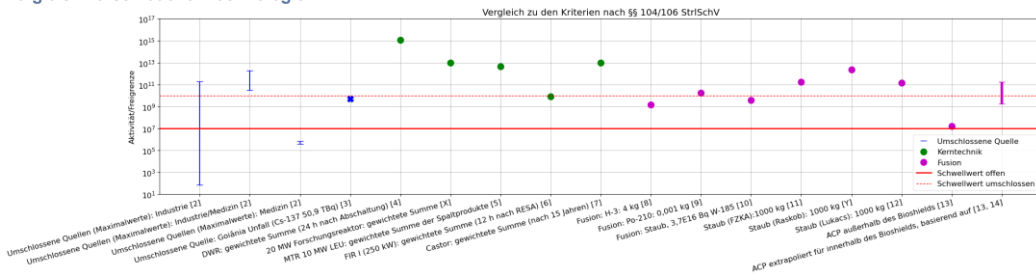


#### Fusion

- Angaben aus Literatur für DEMO/Genehmigung ITER
- Bisher nur Werte für Tokamaks in Literatur identifiziert
- Inventar
  - Tritium
  - Nebenprodukte des Tritiumbrütens
  - Aktivierete Stäube
  - Aktivierete Korrosionsprodukte
  - Aktivierete Strukturen (fehlen hier)



### Vergleich verschiedener Technologien



### Zusammenfassung

- Fusionsanlagen liegen am oberen Ende bzw. über hochradioaktiven Strahlenquellen, die nach Strahlenschutzrecht genehmigt wurden
- Fusionsanlagen liegen deutlich unter Kernkraftwerken
- Bisher nur Literaturwerte des Inventars bekannt
- Tatsächliches Inventar wird stark von der gewählten Technologie (Magnet-, Laserfusion, ...) und der Umsetzung (Kühlmittel, Brutdesign, Strukturmaterialien, Betriebsweise, ...) abhängen

### Literatur

- [1] N. Dymke, Radiological basis for the determination of exemption levels, Kerntechnik 67 (2002), 1
- [2] K.-H. Mötzus et al., Wissenswerte über hochradioaktive Strahlenquellen, BS-SG-17/12, November 2012
- [3] IAEA, The Radiological Accident in Gollnig, ST/PI-B/81/5, Vienna, 1988
- [4] Leitlinien für den Fachbereich Strahlenschutz der Katastrophenschutzleitung bei kerntechnischen Notfällen, Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Nr. 37 (2004)
- [5] Ullrich et al., Modeling and simulation of release of radioactivity from a typical MTR type research reactor under accidental conditions, 2009 IEEE 13th International Multiphase Conference
- [6] Baly et al., Nuclear inventory of FFR 1 TRIGA research reactor fuel, Annals of Nuclear Energy 141 (2020) 107352
- [7] P. Pfeiffer et al., VSG: Abfallspezifikation und Mengengerüst - Basis der Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke (September 2010) AP 3, GRS-274, 2011, P. Pfeiffer et al., VSG: Abfallspezifikation und Mengengerüst - Basis der Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke (Juli 2011) - AP 3, GRS-276, 2011
- [8] Décret n° 2012-1248 du 9 novembre 2012 autorisant l'Organisation internationale ITER à créer une installation nucléaire de base dénommée « ITER » sur la commune de Saint-Paul-lès-Durance (Bouches-du-Rhône)
- [9] Merleins, M., et al.: 210Po production in the European DEMO fusion reactor. Nuclear Fusion, 59, 106029, August 2019, Merleins, Merlijn, The Production and Molecular Occurrence of Radioisotope Po-210 in Nuclear Fusion and Fusion Reactors, Ghent University, Faculty of Engineering and Architecture, 2019
- [10] Lukats, M., and Williams, L. G., Nuclear safety issues for fusion power plants, Fusion Engineering and Design, Volume 150, 111377, 2020
- [11] W. Raskob, I. Hasemann, L. Di Pace: Final Documentation on Dose Assessments for Three Potential European ITER Candidate Sites with Updated Source Terms from ITER NRSR-2, Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt, FKZ 6404, März 2000
- [12] Lukats, M., and Williams, L. G., A sensitivity analysis of the factors that influence the hazard potential of fusion power plants, Fusion Engineering and Design, Volume 164, March 2021, 112183
- [13] Termonia et al., Activated Corrosion Products Evaluations for Occupational Dose Mitigation in Nuclear Fusion Facilities, Environment 2022, 9(7), 76
- [14] D. Carloni et al., Use of the OSCAR-Fusion V1.4 code for a preliminary assessment of the ACP contamination within the main ITER water cooling circuit, 2024 Nucl. Fusion 64 076020
- [X-Y] private communication to be published

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt im Rahmen des Programms FUSION 2040 – Forschung auf dem Weg zum Fusionskraftwerk (Vertragsnummer 13F1002A) gefördert.

Gefördert durch:



## Simulationsverfahren für Stör- und Unfallanalysen in Fusionsanlagen

### Motivation

- Im Rahmen von Genehmigungsverfahren: Überprüfung des Sicherheitskonzepts
- Simulationscodes notwendig, um die Einhaltung von Nachweiskriterien für Schutzziele zu überprüfen
- Bewertung der Schutzmaßnahmen zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung der Anlage
- Eigenständiger Code für Gutachter/Genehmigungsbehörde
- Eigene Entwicklung erlaubt Kontrolle und gegebenenfalls schnelle Anpassung/Erweiterung
- Detaillierte Anforderungen an Codes für Sicherheitsanalysen im Verbundprojekt ReFus ermittelt

EUROfusion ist Hauptquelle für internationale Arbeiten zu Sicherheitsanalysen und Codes

Codes **verwendet** / **entwickelt** in EUROfusion WPSAE

- Thermohydraulik: **MELCOR186** for fusion (SNL), **ASTEC** (ASNR)
- Neutronik & Aktivierung: **MCNP** (Los Alamos), **FISPACT-II** (UKAEA), **ACAB** (NEA), **ActiFlow&GammaFlow** (UKAEA)
- Korrosionsprodukte (ACP): **OSCAR-Fusion** (CEA)
- radiologische Freisetzung: **UFOTRI&COSYMA** (KIT), **JRODOS** (KIT),
- Brand / Explosion: **FDS** (NIST) / **COM3D** (KIT)
- Flüssiges Metall (PbLi): **SIMMER** (JAEA, KIT)

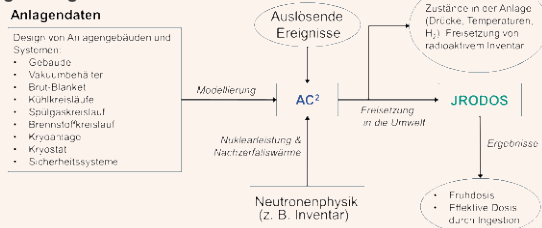
Weitere sicherheitsrelevante Codes werden verwendet / entwickelt (in div. WPs)

- Codes für Staub- und Tritiuminventarverteilung
- CFD und FEM Codes

### Empfehlungen

- Erweiterung der bestehenden und für die Kerntechnik erprobten Codes AC2 & JRODOS auf nationaler Ebene
  - Anpassung an vorhandene Fusionsanforderungen
  - Qualifizierung durch fusionsspezifische Validierung
  - Gewährleistung einer langfristigen Wartung der Codes
- Weiterentwicklung im Blick auf künftige Fusionskraftwerke
- Sicherstellung technologischer Souveränität, Sicherheitsstandards & Wettbewerbsfähigkeit

### Vorgeschlagene Rechenkette



### Erste mögliche ERWEITERUNG von nationalen Codes:

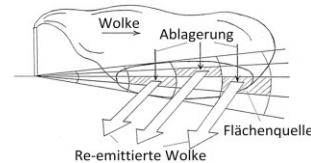
#### AC<sup>2</sup>

- Erweiterung des Anwendungsbereiches der Stoffwerte (kryogene Medien, Wasser- / He-Ausströmung ins Vakuum, niedrige Drücke und Temperaturen in Vakuumbehälter und Kryostat)
- Verbesserung von thermohydraulischen und chemischen Einzelmodellen unter Störfallbedingungen (Verdampfungsleistung im Vakuumbehälter bei Wassereintruchszenarien, Oxidation der First Wall, Eisbildung)

- Ergänzung von Einzelmodellen zum Verhalten mobiler radioaktiver Stoffe
  - Transport von Tritium & aktivierten Korrosionsprodukten
  - Tritium-Permeation in Strukturen
  - Mobilisierung von Stäuben
- Freisetzung von Radionukliden (Quellterm)

#### JRODOS

- Modellierung der Interaktion des Tritiums zwischen Boden, Pflanzen und Atmosphäre
- Modellierung von einigen tausend Flächenquellen und Ausbreitung dieser Aktivität in der Atmosphäre



Das Projekt wird vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt im Rahmen des Programms FUSION 2040 – Forschung auf dem Weg zum Fusionskraftwerk (Vertragsnummer 13F1002A) gefördert.

Gefördert durch:  

 Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

## ISO 16646:2024-12

### Fusionsanlagen – Kriterien für die Auslegung und den Betrieb von Einschluss- und Lüftungssystemen von Tritium-Fusionsanlagen und Anlagen zur Handhabung von Fusionsbrennstoff

#### Anwendungsbereich

Sicherheitstechnische Anforderungen an Einschluss- und Lüftungssysteme, speziell für Fusionsanlagen inkl. zugehörige Gebäude (z.B. für Heiße Zellen) zur sicheren Handhabung von hohen **Tritiuminventaren (mindestens 10 g – 100 g)**.

Ziel: Schutz von Personal, Öffentlichkeit und Umwelt vor den Risiken radioaktiver Kontamination insb. durch die Handhabung, der Ausbreitung in Luft sowie der Freisetzung von Tritium.

Eine zentrale Sicherheitsfunktion in Fusionsanlagen ist der **Einschluss radioaktiver Stoffe**. Aufgrund der hohen Flüchtigkeit von Tritium und seiner Fähigkeit, statische Barrieren zu durchdringen, sind zudem **dynamische Einschlusssysteme** erforderlich. Unterdruckbereiche, angepasste Luftwechselraten und aktive Detritiationssysteme minimieren die Permeation von Tritium durch Barrieren und die Freisetzung in die Umwelt. Obwohl Tritium eine geringe Radiotoxizität aufweist, erfordern die physikalischen Eigenschaften und das in Fusionsanlagen voraussichtlich hohe Inventar umfassende **Sicherheitsmaßnahmen** sowohl für **Normalbetrieb** als auch für **Störfall und Notfall**.

#### Inhalt

Allgemeine Besonderheiten des Einschlusses in Tritium-Fusionsanlagen oder bei der Handhabung von Fusionsbrennstoffen.

Funktionen und Sicherheitsaspekte für Einschluss- und Belüftungssysteme inkl. **Risikoanalyse** und Klassifizierung.

Beschreibung und Architektur des statischen sowie 1. und 2. dynamischen Einschlusssystemen.

**Anforderungen** an die **Auslegung** von dynamischen Belüftungssystemen und Filtrierungssystemen

**Management** von allgemeinen (z.B. Brand) und fusionspezifischen **internen und externen Risiken** im Normalbetrieb und Störfall.

Management und Betrieb von Belüftungssystemen: Arbeitsanweisungen, Funktions- und Abnahmeprüfung, Überwachung und Wartung.

Instrumentierung, Steuerung (I&C) sowie Alarmierung.

#### Literatur

[1] ISO 16646:2024 – Fusionsanlagen – Kriterien für die Auslegung und Betrieb von Einschluss- und Lüftungssystemen von Tritium-Fusionsanlagen und Anlagen zur Handhabung von Fusionsbrennstoffen

#### Risikoanalyse

##### 1. Vorläufige Analyse

Ionisierende Strahlung, Ableitungsgrenzwerte, Unfallszenarien, Einschlussisolierung, Vermeidung Leckagen, (nicht-)radiologische interne Ereignisse, externe Ereignisse, Nichtverfügbarkeit von Energie und Fluiden, kombinierte Ereignisse.

##### 2. Risikobewertung

Entsprechend der IAEA Safety Principles. Betrachtung DBA (beyond design basis accident) und DEC (design extension condition) und Synthese an Anforderungen für Einschluss- und Lüftungssysteme.

##### 3. Sicherheitsklassifizierung

Klassifizierung der SSCs (systems, structures & components) mit sicherheitstechnischer Bedeutung und deterministische und probabilistische Analyse hinsichtlich: Sicherheitsfunktion und Bedeutung, Schnittstellen, Lasten und Ereignisse und spez. Anforderungen an Lüftungs- und Einschlusssysteme.

#### Klassifizierung

Die Klassifizierung von Anlagenbereichen basiert auf der spezifischen Kontamination durch Aerosole und Tritium, sowohl im Normalbetrieb als auch unter Stör- und Notfallbedingungen. Aus der Aerosol Einschlussklasse ( $C_A$ ) und der Tritium Einschlussklasse ( $C_T$ ) wird die Gesamtkontamination ( $C_G$ ) ermittelt, die die Unterdruckwerte für die jeweiligen Anlagenbereiche definiert:

| $C_G$ | Art des Raumes oder Bereiches                                                                                                         | Unterdruckwerte                               |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| n. a. | Kontrollräume                                                                                                                         | Überdruck                                     |
| n. a. | Frei von Kontamination.                                                                                                               | Atmosphärischer Druck oder geringer Überdruck |
| C1    | Sauber, keine relevante Kontamination (Aerosole und Tritium). Überwacht.                                                              | 0 Pa – 60 Pa                                  |
| C2    | Weitgehend sauber, geringe Kontamination bei Stör- und Unfällen. Kontrollen erforderlich.                                             | 80 Pa – 100 Pa                                |
| C3    | Geringe normale Kontamination, höhere Werte bei Stör- und Unfällen möglich. Kontrollmaßnahmen notwendig.                              | 120 Pa – 140 Pa                               |
| C4    | Hohe normale Kontamination. Beschränkter Zugang nur mit Schutzausrüstung erlaubt. Erfordert permanente Maßnahmen zur Dekontamination. | 220 Pa – 300 Pa                               |

#### Diskussionspunkte

- Anwendungsbereich der Norm: „Hohes Inventar“ > 10 g – 100 g
- Gestufter Ansatz: Zuordnung der sicherheitstechnischen Klassifizierung zu den Umsetzungsanforderungen der Norm.
- Konkrete Anwendung und Implikation?

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt im Rahmen des Programms FUSION 2040 – Forschung auf dem Weg zum Fusionskraftwerk (Vertragsnummer 13F1002A) gefördert.



MAX-PLANCK-INSTITUT  
FÜR PLASMAPHYSIK  
UND FUSIONSTECHNIK



TÜVRheinland  
Genau. Richtig.



Öko-Institut e.V.  
Institut für angewandte Ökologie  
Institute for Applied Ecology



## B Vorlage zur Einreichung von Kommentaren zum Statusbericht

| Kommentator | Lfd. Nr. | Fundstelle Kapitel/ Seite/ Absatz/ Zeile | Vorgeschlagener neuer Text | Begründung der Änderung | übernommen | mit Änderungen übernommen | zurückgewiesen | Grund der Rückweisung/ Änderung |
|-------------|----------|------------------------------------------|----------------------------|-------------------------|------------|---------------------------|----------------|---------------------------------|
|             |          |                                          |                            |                         |            |                           |                |                                 |
|             |          |                                          |                            |                         |            |                           |                |                                 |

Sofern Sie Kommentare zu diesem Bericht haben, tragen Sie bitte jeden Kommentar einzeln in die ersten fünf Spalten der Kommentartabelle ein. Die Spalten 6 – 9 werden vom ReFus-Team ausgefüllt. Die Tabellen werden nach Bearbeitung veröffentlicht. Durch Einreichung stimmen Sie der Veröffentlichung Ihrer Kommentare zu.

**Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

**85748 Garching b. München**

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

**10719 Berlin**

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

**38122 Braunschweig**

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

[www.grs.de](http://www.grs.de)

**ISBN 978-3-911727-71-6**