

**Verfolgung  
internationaler  
Entwicklungen in  
der Kernfusion**

## **Verfolgung internationaler Entwicklungen in der Kernfusion**

Fachlicher Abschlussbericht

Isabel Steudel  
Gernot Thuma

April 2026

### **Anmerkung:**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Eigenforschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) unter dem Förderkennzeichen 4725R01385 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMUKN übereinstimmen.

**Deskriptoren**

DEMO, Fusion, ICF, Laserfusion, Regulierung, Sicherheit, Trägheitsfusion

## Kurzfassung

Die Entwicklung von Fusionskraftwerken ist eine große wissenschaftliche und technische Herausforderung, weshalb vielfältige Ansätze und Wege verfolgt werden, um die Erfolgswahrscheinlichkeit zu maximieren. Nicht mehr nur die Wissenschaft und öffentliche Forschungseinrichtungen, sondern immer mehr private Unternehmen stellen sich der Herausforderung, Kernfusion kommerziell nutzbar zu machen.

Nach wie vor sind auf dem magnetischen Einschluss basierende Konzepte (Tokamak, Stellarator) ihren Entwicklungsstand betreffend weiter fortgeschritten als Trägheitsfusions-Konzepte. Für die europäischen DEMO-Konzepte wurden international bereits zahlreiche sicherheitstechnische Untersuchungen durchgeführt. Aufbauend auf /GRS 23/ werden in diesem Bericht neu veröffentlichte Ereignisablaufanalysen für europäische DEMO-Anlagen systematisch ausgewertet. Schwerpunkt sind hierbei Transienten der wassergekühlten Lithium-Blei-Blankets, insbesondere Strömungsverluste im primären Wasser- und Flüssigmetallkreislauf sowie mehrere Tritiumfreisetzungsszenarien im inneren und äußeren Tritiumkreislauf.

Weiterhin wird ein Überblick über den technologischen Stand der lasergetriebenen Trägheitsfusion gegeben und es werden die zugrunde liegenden physikalischen Prinzipien sowie die aktuell verfolgten Anlagenkonzepte beschrieben. Es wird gezeigt, dass trotz wichtiger wissenschaftlicher Fortschritte, einschließlich der experimentellen Zündung einzelner Targets, erhebliche technologische Hürden für einen Kraftwerksbetrieb bestehen. Dazu zählen nicht nur die notwendige Effizienzsteigerung der Lasersysteme und die Massenproduktion qualitativ homogener Brennstoffkapseln, sondern auch ungelöste Fragen zur Wärmeabfuhr, Materialbeständigkeit und Tritiumbereitstellung.

Daneben wurden Recherchen zu Sicherheitsfunktionen und sicherheitsrelevanten Systemen durchgeführt. Da weder ein Referenzdesign noch belastbare Werkstoff- und Betriebsdaten für Trägheitsfusionsanlagen existieren, können Sicherheitsfunktionen und relevante Systeme nur qualitativ beschrieben werden. Die radiologischen Konsequenzen möglicher Störfallszenarien hängen stark vom späteren Design ab. Ohne tragfähiges Referenzdesign können Sicherheitsfunktionen und -systeme nicht abschließend spezifiziert werden.

Abschließend wird ein systematischer Überblick über den internationalen Regulierungsstand in unterschiedlichen Ländern gegeben. Dieser zeigt, dass die Regulierungsbehörden weltweit stark unterschiedliche, aber zunehmend risikobasierte und technologieoffene Ansätze verfolgen. Der TECDOC 2115 der internationalen Atomenergieorganisation (International Atomic Energy Agency, IAEA) betont die Notwendigkeit harmonisierter, abgestufter Regulierungsansätze und hebt hervor, dass weltweit noch große Lücken in Normung, Begrifflichkeit und Bewertungsmethodik bestehen. Insgesamt befindet sich der Regulierungsrahmen in einer frühen Phase, die von Unsicherheiten geprägt ist, jedoch zunehmend strukturiert wird.

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Kurzfassung .....</b>	<b>I</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Sicherheitstechnische Aspekte europäischer DEMO-Anlagen .....</b>	<b>3</b>
2.1	Ausfall der Durchströmung des primären Kühlkreises der Ersten Wand und der Blankets aufgrund eines Kompressor- oder Pumpenversagens (FF1, beschrieben nach /CIU 21/ und /CIU 23/).....	6
2.2	Ausfall der Durchströmung im Flüssigmetallkreislauf aufgrund eines Versagens einer elektromagnetischen Pumpe (FM1, beschrieben nach /KHA 23/).....	8
2.3	Freisetzungen aus dem Tritiumkreislauf (TGG1, TGO1, TGO3, THO1 und TWO1, beschrieben nach /SHA 23/).....	12
2.3.1	INTL-1 – Gasfreisetzung aus dem inneren Tritiumkreislauf (TGG-1).....	14
2.3.2	OUTL-1 – Gasfreisetzung aus dem äußeren Tritiumkreislauf (TGO-1 + THO-1).....	15
2.3.3	OUTL-2 – Freisetzung tritiumhaltigen Wassers (TGO-3 + TWO-1) .....	16
2.4	Zwischenfazit .....	18
<b>3</b>	<b>Trägheitsfusionsanlagen-Konzepte .....</b>	<b>19</b>
3.1	Grundlagen der Trägheitsfusion.....	19
3.2	Herausforderungen bei der großtechnischen Nutzung der Trägheitsfusion.....	26
3.3	Aktuelle Trägheitsfusions-Konzepte.....	29
<b>4</b>	<b>Sicherheitsfunktionen und sicherheitsrelevante Systeme .....</b>	<b>39</b>
4.1	Sicherheitsfunktionen.....	39
4.2	Sicherheitsrelevante Systeme.....	41
4.2.1	Reaktionskammer .....	42
4.2.2	Strukturmaterialien und Blanket.....	44
4.2.3	Optik.....	45
4.2.4	Brennstoffsysteme .....	45

4.2.5	Instrumentierungs- und Steuerungssysteme .....	46
4.3	Mögliche Gefahren- und Freisetzungsquellen .....	46
4.3.1	Neutronen .....	49
4.3.2	Tritium .....	49
4.3.3	Staub .....	50
4.3.4	Magnet- & Lasersysteme (Hochstromtechnologien) .....	50
4.4	Mögliche Störfallszenarien .....	51
4.5	Zwischenfazit .....	53
<b>5</b>	<b>Internationaler Entwicklungsstand bezüglich der Regulierung von Fusionsanlagen .....</b>	<b>55</b>
5.1	Deutschland .....	55
5.2	USA .....	56
5.3	Großbritannien .....	59
5.4	Japan .....	61
5.5	Kanada .....	62
5.6	IAEA TECDOC 2115 „International Experience in the Regulation of Fusion Facilities” .....	63
<b>6</b>	<b>Fazit .....</b>	<b>67</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>71</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>79</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>81</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>83</b>

# 1 Einleitung

Energie aus der kontrollierten Fusion von Wasserstoff nutzbar zu machen, ist ein seit langer Zeit verfolgtes Ziel. Die nahezu unbeschränkten Ressourcen, die große Energiedichte und die im Vergleich zur Kernspaltung deutlich reduzierte Endlagerproblematik sind starke Antriebsfaktoren für die Forschung. Hierbei sind Fusionsanlagen von der Bauart Tokamak am weitesten verbreitet und am besten erforscht. Neben staatlich geförderten Großvorhaben, wie dem Fusionsexperiment ITER in Cadarache, arbeiten mittlerweile zahlreiche privatwirtschaftliche Unternehmen an der Kernfusion und verfolgen teilweise grundlegend unterschiedliche technische Ansätze zu deren Realisierung.

Auch die deutsche Bundesregierung sieht großes Potenzial in der Fusion. Ihr Ziel ist laut dem Koalitionsvertrag, das erste kommerzielle Fusionskraftwerk in Deutschland zu bauen. Mit Hilfe der „Hightech Agenda Deutschland“ soll Deutschland zum führenden Standort für neue Technologien gemacht werden. Dabei konzentriert man sich auf sechs Schlüsseltechnologien, darunter auch Fusion und klimaneutrale Energieerzeugung. Mit dem Aktionsplan „Deutschland auf dem Weg zum Fusionskraftwerk“ wird eine wichtige Maßnahme der Hightech Agenda Deutschland umgesetzt. Den Aktionsplan Fusion wertet die Bundesregierung als ein Bekenntnis zur Fusionsforschung. Auch die Bundesländer haben eigene Initiativen ins Leben gerufen. So haben beispielsweise die Hansestadt Hamburg gemeinsam mit Bayern, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen und Schleswig-Holstein Ende des Jahres 2025 eine Allianz zur Erforschung der Kernfusion gegründet, um Wissenschaft, Industrie und Politik besser miteinander zu vernetzen

Neben dem technologischen Ansatz des magnetischen Einschlusses, auf dem Tokamak-Konzepte wie DEMO, Stellaratoren, Anlagen mit magnetisiertem Target und Reversed-Field-Pinch-Anlagen beruhen, wird jüngst immer häufiger der Ansatz der Trägheitsfusion verfolgt.

Im vorliegenden Bericht wird zunächst auf Sicherheitsaspekte der europäischen DEMO-Konzepte eingegangen (Kapitel 2). Diese waren bereits Gegenstand des Berichts GRS-724 /GRS 23/, daher werden hier nur Ereignisablaufanalysen vorgestellt, die seit diesem Bericht neu veröffentlicht wurden.

In Kapitel 3 wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Trägheitsfusion gegeben. Nach einer Einführung in die Grundlagen der Trägheitsfusion und die bei der großtechnischen Nutzung zu erwartenden Herausforderungen werden unterschiedliche, derzeit

verfolgte Konzepte für die Energieumwandlung durch Trägheitsfusion beschrieben. Dies dient als Ausgangspunkt für eine in Kapitel 4 vorgenommene ingenieurmäßige Einschätzung, welche Sicherheitsfunktionen in solchen Anlagen relevant sind, welche Systeme dabei eine Rolle spielen und welche Gefahren- und Freisetzungsquellen existieren. Da die öffentlich verfügbaren Informationen zu Trägheitsfusionsanlagen bisher sehr begrenzt sind, ist diese Diskussion notwendigerweise auf übergeordnete Aspekte beschränkt. Eine sicherheitstechnische Bewertung kann erst erfolgen, wenn mehr Informationen zu technischen Details der Konzepte und Störfallanalysen veröffentlicht werden.

Um den Überblick zu aktuellen Entwicklungen in der Kernfusion abzurunden, werden in Kapitel 5 die neuesten regulatorischen Entwicklungen für verschiedene Länder kurz zusammengefasst. Außerdem werden die relevanten Informationen des im Februar 2026 veröffentlichten IAEA TECDOC 2115 „International Experience in the Regulation of Fusion Facilities“ zusammenfassend dargestellt.

## 2            **Sicherheitstechnische Aspekte europäischer DEMO-Anlagen**

Wesentliche sicherheitstechnische Aspekte europäischer DEMO-Anlagen (Fusionsanlagenkonzepte nach dem Tokamak-Prinzip) wurden bereits im Bericht GRS-724 /GRS 23/ diskutiert. Im vorliegenden Bericht werden daher nur seitdem neu hinzugekommene Informationen hinsichtlich weiterer analysierter Ereignisabläufe dargestellt.

Für ein DEMO-Konzept mit wassergekühlten Lithium-Blei-Blankets wurde in /PIN 17/ ein Satz von 21 repräsentativen Auslösenden Ereignissen (postulated initiating events, PIE) identifiziert (vergl. Tab. 2.1).

Im Bericht GRS-724 /GRS 23/ wurden die aus den folgenden Auslösenden Ereignissen resultierenden Ereignisabläufe beschrieben:

- Divertor LOFA<sup>1</sup> (FD1 nach /CAR 22/),
- Verlust der Hauptwärmesenke (HA99 nach /PIN 17/),
- Ex-Vessel LOCA<sup>2</sup> (LBO1 nach /CAR 22/),
- In-Vessel LOCA (LFV1 nach /CAR 22/) und
- LOVA<sup>3</sup> (VVA1 nach /LUK 20/).

Außerdem erfolgte eine Diskussion von Einwirkungen von innen und außen auf der Basis von /LUK 20/.

Seit der Erstellung dieses GRS-Berichts wurden neue Ereignisablaufanalysen zu weiteren Auslösenden Ereignissen veröffentlicht. Hier sind insbesondere die Analysen

- zum Ausfall der Durchströmung des primären Kühlkreises der Ersten Wand und der Blankets aufgrund eines Kompressor- oder Pumpenversagens (FF1),

---

<sup>1</sup> LOFA – Loss of Flow Accident

<sup>2</sup> LOCA – Loss of Coolant Accident

<sup>3</sup> LOVA – Loss of Vacuum Accident

- zum Ausfall der Durchströmung im Flüssigmetallkreislauf aufgrund eines Versagens einer elektromagnetischen Pumpe (FM1) und
- zu Freisetzungen aus dem Tritiumkreislauf (TGG1, TGO1, TGO3, THO1 und TWO1)

zu nennen. Die entsprechenden Ereignisabläufe werden in den nachfolgenden Abschnitten dargestellt.

**Tab. 2.1** Liste repräsentativer Auslösender Ereignisse (PIE) für ein EU-DEMO-Design mit WCLL<sup>4</sup>-Blankets nach /PIN 17/

In der dritten Spalte ist angegeben, ob die jeweiligen Ereignisabläufe in GRS-724 /GRS 23/ oder im vorliegenden Bericht (Angabe des entsprechenden Abschnitts) behandelt sind. Zu den Ereignissen, für die kein Eintrag existiert, konnten keine Ereignisablaufanalysen gefunden werden.

PIE	Ereignisbeschreibung	Beschreibung
FB1	Ausfall der Durchströmung des primären Kühlkreises des Brutmaterials aufgrund eines Kompressor- oder Pumpenversagens.	
FD1	Ausfall der Durchströmung des primären Kühlkreises des Divertors aufgrund eines Pumpenversagens.	GRS-724
FF1	Ausfall der Durchströmung des primären Kühlkreises der Ersten Wand und der Blankets aufgrund eines Kompressor- oder Pumpenversagens.	Abschnitt 2.1
FM1	Ausfall der Durchströmung im Flüssigmetallkreislauf aufgrund eines Versagens einer elektromagnetischen Pumpe: Der Durchfluss von LiPb kommt in allen von diesem Kreislauf versorgten Blanketmodulen zum Erliegen.	Abschnitt 2.2
HA99	Ausfall der Wärmesenke aller primären Kühlkreise der Ersten Wand, der Blankets, der Brutzone und des Divertors aufgrund eines Ausfalls der Hoch- und Niederdruckturbinen durch einen Vakuumverlust im Kondensator.	GRS-724
LFB1	Kühlmittelverlust innerhalb des Vakuumbehälters (In-Vessel LOCA) aus dem Kühlkreis der Ersten Wand oder dem Blanket-Kühlkreis aufgrund eines großen Lecks an einer Dichtungsschweißnaht.	

<sup>4</sup> WCLL-Blankets sind wassergekühlte Lithium-Blei-Blankets (Water Cooled Lithium Lead Blankets). Eine zweite Blanketvariante, die für DEMO in der Diskussion ist, sind heliumgekühlte Schüttbettblankets (Helium Cooled Pebble Bed Blankets, HCPB-Blankets).

<b>PIE</b>	<b>Ereignisbeschreibung</b>	<b>Beschreibung</b>
LBO1	Kühlmittelverlust außerhalb des Vakuumbehälters (Ex-Vessel LOCA) aus dem primären Kühlkreis der Brutzone aufgrund eines großen Lecks der Kühlmittelsammelleitung innerhalb der Räume des primären Wärmeabfuhrsystems.	GRS-724
LBO3	Kühlmittelverlust außerhalb des Vakuumbehälters (Ex-Vessel LOCA) aus dem primären Kühlkreis der Brutzone aufgrund eines Bruchs mehrerer Rohre in einem primären Wärmetauscher (oder Dampferzeuger).	
LFV1	Kühlmittelverlust innerhalb des Vakuumbehälters (In-Vessel LOCA) aufgrund eines großen Lecks der Ersten Wand: vollständiges Versagen der Ersten Wand.	GRS-724
LDO1	Kühlmittelverlust außerhalb des Vakuumbehälters (Ex-Vessel LOCA) aus dem primären Kühlkreis des Divertors aufgrund eines großen Lecks der Kühlmittelsammelleitung innerhalb der Räume des primären Wärmeabfuhrsystems.	
LDV1	Kühlmittelverlust innerhalb des Vakuumbehälters (In-Vessel LOCA) aus dem primären Kühlkreis des Divertors aufgrund eines großen Lecks der Divertorkassette.	
LMO1	Verlust von flüssigem Metall aus dem LiPb-Kreislauf außerhalb des Vakuumbehälters aufgrund eines großen Lecks des kalten Strangs hinter der elektromagnetischen Pumpe (Ausfall der Versorgung mit LiPb aller von dieser Leitung versorgten Blanketmodule).	
LMO2	Verlust von flüssigem Metall aus dem LiPb-Kreislauf außerhalb des Vakuumbehälters aufgrund einer Leckage im kalten Strang hinter der elektromagnetischen Pumpe.	
LMO3	Leck an der Flüssigmetalleitung (außerhalb des Vakuumbehälters) in einem Wärmetauscher (oder Dampferzeuger), d. h. Bruch mehrerer Rohre in einem Wärmetauscher für LiPb.	
TGG1	Leck einer Gas-Leitung für Tritium innerhalb eines zweiten Einschlusses (z. B. in einer Handschuhbox): Tiefsttemperaturmedium und Tritium-Gas treten in das Schutzvakuum des Pellet-Injektors aus.	Abschnitt 2.3
TGO1	Tritiumgasaustritt (außerhalb des Vakuumbehälters) aufgrund eines doppelendigen Bruchs einer Prozessleitung des Isotopenseparationssystems (isotopic separation system, Tritiumaustritt im Gebäude).	Abschnitt 2.3
TGO3	Freisetzung tritiumhaltiger Abwässer in die Umwelt aufgrund einer Fehlbedienung des Tritium-Aufbereitungs-Systems, z. B. Nicht-Aktivierung der Kryo-Destillationskolonnen im Isotopenseparationssystem.	Abschnitt 2.3

PIE	Ereignisbeschreibung	Beschreibung
THO1	Doppelendiger Bruch einer Wasserstoffleitung am Ausgang des Elektrolyseurs; unmittelbare Tritiumfreisetzung in die Räume des Wasserdetriierungssystems; Gefahr einer Wasserstoffexplosion.	Abschnitt 2.3
TWO1	Leck an einem Tank des Wasserdetriierungssystems mit hochradioaktivem Inhalt.	Abschnitt 2.3
VCG1	Verlust des Kryostatvakuums aufgrund eines nennenswerten Gaseinbruchs (Helium und/oder Luft).	
VVA1	Verlust des Vakuums (LOVA) im Vakuumbehälter aufgrund eines nennenswerten Lufteinbruchs verursacht durch das Versagen einer Vakuumbehälterdurchführung.	GRS-724

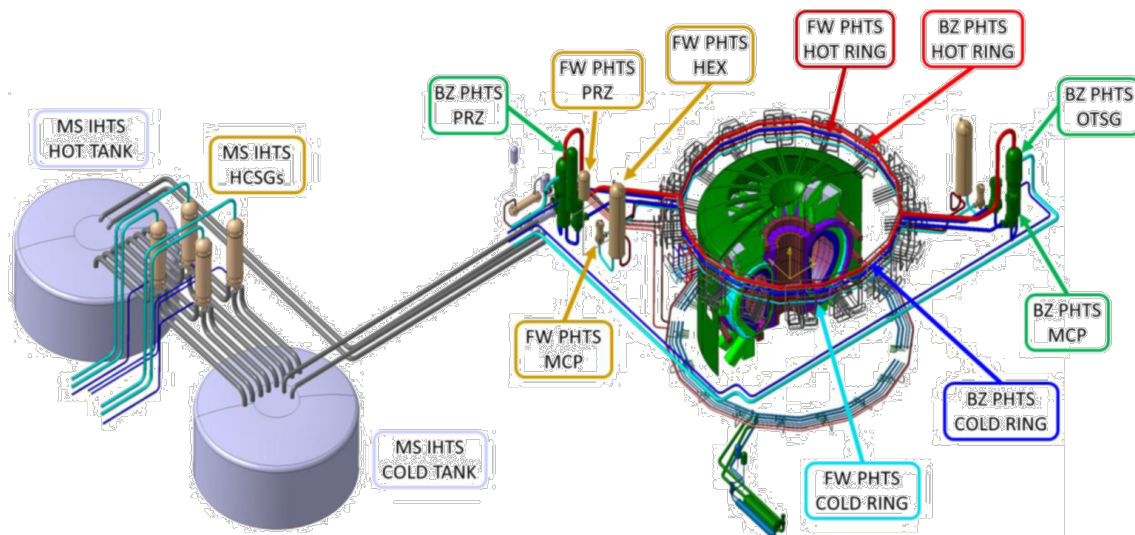
## 2.1 Ausfall der Durchströmung des primären Kühlkreises der Ersten Wand und der Blankets aufgrund eines Kompressor- oder Pumpenversagens (FF1, beschrieben nach /CIU 21/ und /CIU 23/)

Das Störfallszenario FF1 besteht in einer Blockierung bzw. einem Festfressen der Welle einer Kühlmittelpumpe der Brutzone oder der Ersten Wand. Einen Überblick über die betreffenden Kühlmittelkreisläufe gibt Abb. 2.1. In Abb. 2.2 ist der Verlauf der Kühlmittelleitungen innerhalb einer äquatorialen Zelle eines Blankets (central outboard blanket, COB) dargestellt.

In /CIU 21/ und /CIU 23/ werden Ereignisabläufe für vier Varianten dieses Szenarios beschrieben:

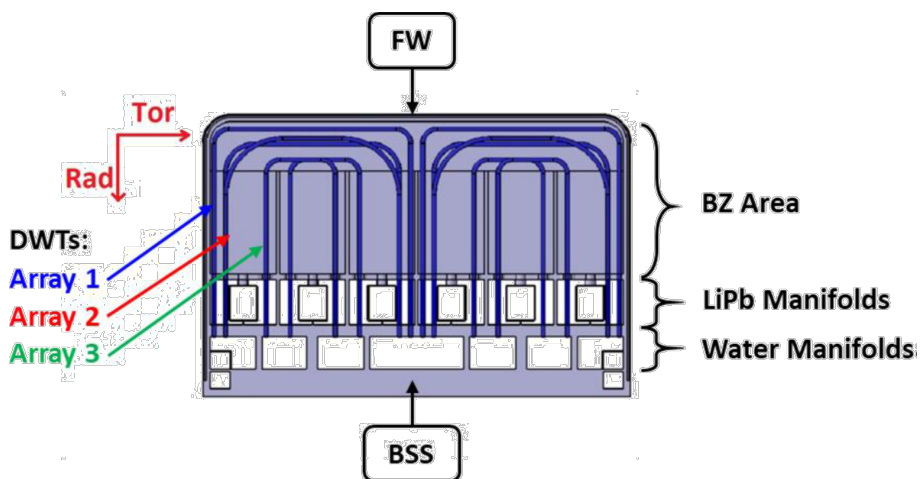
- Ausfall einer von vier Pumpen des Kühlkreislaufs der Brutzone ohne Ausfall der externen Stromversorgung,
- Ausfall einer von vier Pumpen des Kühlkreislaufs der Brutzone mit Ausfall der externen Stromversorgung,
- Ausfall einer der beiden Pumpen des Kühlkreislaufs der Ersten Wand ohne Ausfall der externen Stromversorgung und
- Ausfall einer der beiden Pumpen des Kühlkreislaufs der Ersten Wand mit Ausfall der externen Stromversorgung.

In allen vier Varianten werden in Folge des Pumpenausfalls eine Plasmaschnellabschaltung und eine Turbinenabschaltung ausgelöst.



**Abb. 2.1** Übersicht der Kühlkreisläufe von DEMO nach /CIU 23/

BZ – Breeding Zone (Brutzone)  
 FW – First Wall (Erste Wand)  
 HCSG – Helicoidal Coil Steam Generator (Dampferzeuger)  
 HEX – Heat Exchanger (Wärmetauscher)  
 MCP – Main Coolant Pump (Hauptkühlmittelpumpe)  
 MS IHTS – Molten Salt Intermediate Heat Transfer System (Flüssigsalz-Zwischenkühlsystem)  
 OTSG – Once Through Steam Generator (Dampferzeuger)  
 PHTS – Primary Heat Transfer System (Primäres Kühlsystem)  
 PRZ – Pressurizer (Druckhalter)



**Abb. 2.2** Äquatoriale Zelle eines Blankets (central outboard blanket, COB) nach /CIU 23/

BSS – Back Supporting Structure (Rückwärtige Tragstruktur)  
 BZ Area – Breeding Zone Area (Brutzone)  
 DWT – Double Walled Tubes (Doppelwandige Kühlmittelleitungen)  
 FW – First Wall (Erste Wand)

Bei den Szenarien ohne Ausfall der externen Stromversorgung kommt es im weiteren Verlauf

- zum sekundärseitigen Ansprechen von Sicherheitsventilen und
- zum primärseitigen Ansprechen von betrieblichen Druckhalterentlastungsventilen (Power-Operated Relief Valve, PORV).

Die primärseitigen Temperaturen und Drücke bleiben jedoch im Auslegungsbereich, so dass keine Strukturschäden zu erwarten sind.

In beiden Szenarien mit Ausfall der externen Stromversorgung resultiert aus der Turbinenabschaltung ein Ausfall aller Hauptkühlmittelpumpen und damit der Übergang der Kühlsysteme in den Naturumlauf. Da durch den Ausfall der Stromversorgung das Druckhaltersprühsystem nicht zur Verfügung steht und der Wärmeabtransport bei Naturumlauf weniger effektiv ist als bei einer erzwungenen Durchströmung, sprechen die (betrieblichen) PORV häufiger an. Nach den Analysen in /CIU 21/ und /CIU 23/ können das Blanket und die Strukturen der Kühlsysteme den auftretenden Lasten jedoch widerstehen, so dass es auch in diesen Szenarien nicht zu Freisetzungen kommt.

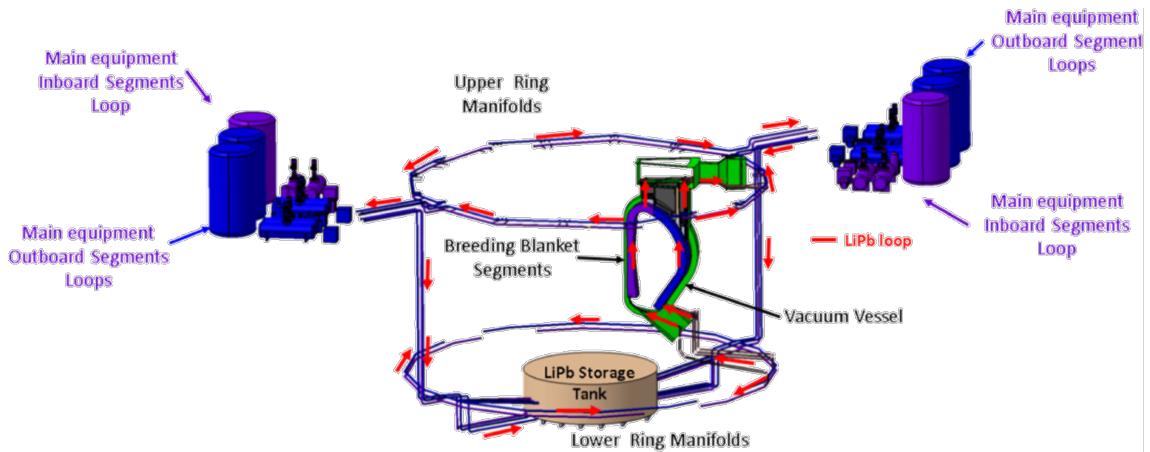
Die radiologischen Auswirkungen des Auslösenden Ereignisses FF1 beschränken sich auf das Ansprechen der Druckhalterentlastungsventile und damit die Abgabe von (eventuell aktivitätshaltigem) Wasser in den Entlastungstank. Dies gilt – wie beschrieben – auch für die Szenarien mit Ausfall der externen Stromversorgung. Insofern können für dieses Auslösende Ereignis keine weiteren Angaben zu Freisetzungen gemacht werden. Neben der bereits im Design vorgesehenen Maßnahme zur Rückhaltung radioaktiver Stoffe, dem Entlastungstank, scheinen keine weiteren Maßnahmen erforderlich zu sein.

## **2.2 Ausfall der Durchströmung im Flüssigmetallkreislauf aufgrund eines Versagens einer elektromagnetischen Pumpe (FM1, beschrieben nach /KHA 23/)**

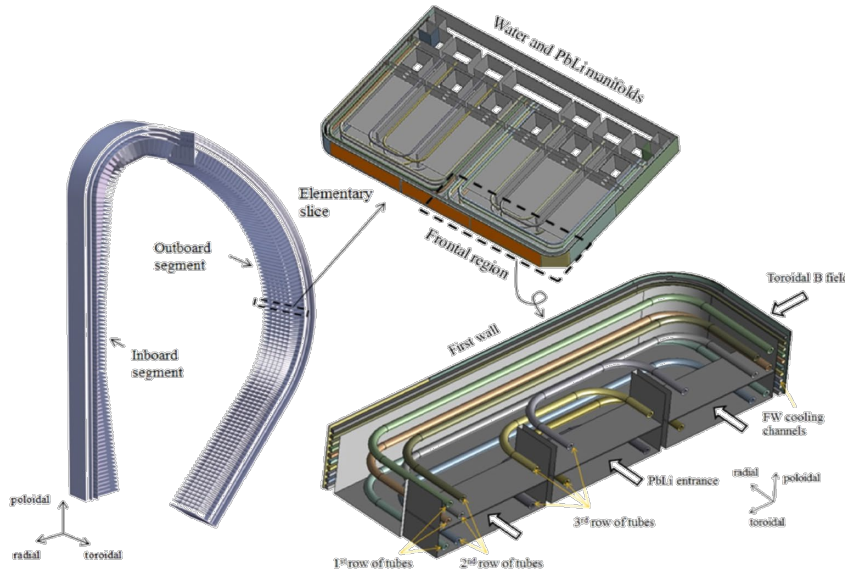
Das Störfallszenario FM1 betrifft ebenfalls das WCLL-Brutblanket. Hier wird der Ausfall einer elektromagnetischen Pumpe, die der Umwälzung der flüssigen Blei-Lithium-Legierung im Blanket dient, unterstellt. Die Autoren von /KHA 23/ beschreiben hierzu zwei Ereignisabläufe, einen theoretisch denkbaren, bei dem es zum Versagen der Blanketstruktur und in der Folge zu einem In-Vessel-LOCA (ähnlich dem in /GRS 23/

beschriebenen Ereignis LFV1) kommt, und einen, der sich aus ihrer (stark vereinfachten Analyse) ergibt und weit geringere Auswirkungen hat.

Zum besseren Verständnis der Ereignisablaufbeschreibungen sind in Abb. 2.3 und Abb. 2.4 der Blei-Lithium-Kreislauf und der Aufbau der Blanketzellen dargestellt.



**Abb. 2.3** Isometrie des Blei-Lithium-Kreislaufs nach /KHA 23/



**Abb. 2.4** Isometrie der äquatorialen Blanketzellen (inboard, IB, and central outboard, COB) nach /KHA 23/

## Theoretisch möglicher Ereignisablauf

Die Autoren beschreiben in /KHA 23/ zunächst einen theoretisch möglichen bzw. denkbaren Ereignisablauf, bei dem es zum Versagen der Blanketstruktur und einer Freisetzung der Blei-Lithium-Legierung in den Vakuumbehälter kommt. Durch den gleichzeitigen Kühlmittelaustritt resultieren hieraus ein Druckanstieg im Vakuumbehälter und eine Druckentlastung in das Expansionsvolumen oder das Druckentlastungssystem. Wie bei anderen In-Vessel LOCA (vergl. /GRS 23/) kann es im Weiteren auch zu radioaktiven Freisetzungen durch überdruckbedingte Leckagen kommen.

Im Einzelnen sieht der Ablauf wie folgt aus:

- automatische Plasmaabschaltung,
- Überhitzung der Materialien in allen Blanket-Modulen,
- Ausdehnung des PbLi und Anstieg des PbLi-Spiegels im Ausgleichstank,
- evtl. Zusammenbruch des PbLi-Naturumlaufs,
- Versagen von Blanketstrukturen durch thermische und mechanische Lasten,
- In-Vessel-LOCA:
  - Freisetzung von PbLi und Kühlmittel in den Vakuumbehälter mit daraus folgendem Druckanstieg und einer Druckentlastung ins Expansionsvolumen/Druckabbausystem,
  - Freisetzung radioaktiver Stoffe ins Expansionsvolumen/Druckabbausystem,
  - evtl. Freisetzung radioaktiver Stoffe durch Leckagen des (druckbeaufschlagten) Vakuumbehälters.

Da dieser Ablauf nur qualitativ beschrieben wird, machen die Autoren auch keine Aussagen zum Umfang möglicher Freisetzungen. Überlegungen auf Basis des in GRS-724 /GRS 23/ beschriebenen In-Vessel-LOCA-Ereignisses (LFV1) wären auch nicht aussagekräftig, da dort kein WCLL-Blanket sondern ein heliumgekühltes Schüttbettblanket betrachtet wird.

## Simulation des Ereignisablaufs mit MELCOR

Für die Simulation des Ereignisablaufs mit „MELCOR 1.8.5 for fusion“ wurden in /KHA 23/ vereinfachte Annahmen auf der Grundlage von Symmetrieüberlegungen vorgenommen. Insbesondere wurden die Rechnungen nur für einen Inboard-Kühlkreislauf durchgeführt anstatt für vier Outboard-Loops und zwei Inboard-Loops.

Bei dem simulierten Ereignisablauf kommt es zu einer automatischen Plasmaabschaltung, nach der die Drücke und Temperaturen jedoch nur so weit ansteigen, dass es nicht zum Versagen der Ersten Wand und damit auch zu keiner PbLi- und Kühlmittel-Freisetzung in den Vakuumbehälter kommt. Dementsprechend wird auch keine Tritium-Freisetzung erwartet.

Allerdings weisen die Autoren darauf hin, dass ein In-Box-LOCA (Freisetzung von Kühlmittel in das Blanket durch Versagen von Kühlmittelleitungen) durchaus möglich ist. Für dieses Szenario wären weitere Analysen zu möglichen Folgen erforderlich, die im Rahmen der Studie /KHA 23/ jedoch nicht durchgeführt wurden.

Auch ein Out-Box-LOCA (Freisetzung von Kühlmittel außerhalb des Vakuumbehälters) durch einen übermäßigen Druckanstieg in der unteren Ringleitung ist denkbar und sollte aus Sicht der Autoren daher als Auslegungsstörfall betrachtet werden. Ein solches Szenario würde dem Ex-Vessel-LOCA LBO1 (in GRS-724 /GRS 23/ nach /CAR 22/ beschrieben) entsprechen. Für dieses Ereignis kommen die Analysen nach /CAR 22/ zu den in Tab. 2.2 und Tab. 2.3 dargestellten Freisetzungen und Dosiswerten.

**Tab. 2.2** Freisetzungen bei einem Ex-Vessel LOCA (LBO1) für die vier in /CAR 22/ simulierten Fälle

Szenario	Aktivierte Korrosionsprodukte	Tritium (in Wassermolekülen)
Fall 1	$6,07 \cdot 10^{-9}$ g	$3,26 \cdot 10^{-6}$ g
Fall 2	$3,39 \cdot 10^{-6}$ g	$1,22 \cdot 10^{-3}$ g
Fall 3	$3,53 \cdot 10^{-6}$ g	$1,80 \cdot 10^{-3}$ g
Fall 4	$6,93 \cdot 10^{-6}$ g	$3,17 \cdot 10^{-3}$ g

**Tab. 2.3** Dosiswerte für den Störfall „Ex-Vessel LOCA“ bei Konzepten mit WCLL-Blankets nach /CAR 22/

Dosiswerte in mSv (95 % Fraktile)		0,5 km	1,0 km	5,0 km	10,0 km
Ex-Vessel LOCA (WCLL-Blankets)	Frühe Dosis	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$
	Mit Inkorporation	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$7,9 \cdot 10^{-5}$

In /GRS 23/ hat die GRS die folgenden Maßnahmen zur Reduzierung von Freisetzungen identifiziert:

- Begrenzung von Druckspitzen, z. B. durch Segmentierung der Blanket-Kühlschleifen oder eine Vergrößerung der Raumvolumina,
- eine Abluffilteranlage, die in der Lage ist, Wasserdampf (insbesondere HTO) zurückzuhalten, und ein Tritium-Abscheide-System (Voraussetzung ist hierbei, dass eine Vermeidung oder ausreichende Verzögerung des Barriereverlustes erreicht werden kann),
- Begrenzung der Strömungsgeschwindigkeit in den Rohrleitungen beim Bruch einer Leitung (der Rückhalteeffekt beruht darauf, dass aktivierte Korrosionsprodukte großenteils an Oberflächen anhaften und erst bei ausreichender Strömungsgeschwindigkeit mobilisiert werden).

### 2.3 Freisetzungen aus dem Tritiumkreislauf (TGG1, TGO1, TGO3, THO1 und TWO1, beschrieben nach /SHA 23/)

Im Rahmen der Studie zu Störfällen im Tritiumkreislauf (Abb. 2.6) /SHA 23/ wurden die fünf Auslösenden Ereignisse

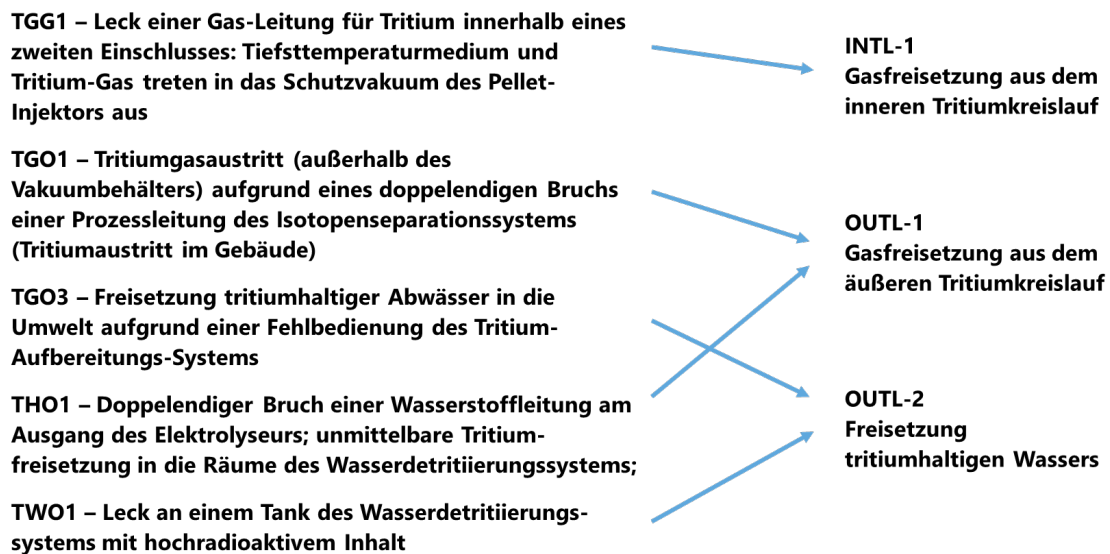
- TGG1 – Leck einer Gas-Leitung für Tritium innerhalb eines zweiten Einschlusses: Tiefsttemperaturmedium und Tritium-Gas treten in das Schutzvakuum des Pellet-Injektors aus,
- TGO1 – Tritiumgasaustritt (außerhalb des Vakuumbehälters) aufgrund eines doppelendigen Bruchs einer Prozessleitung des Isotopenseparationssystems (Tritiumaustritt im Gebäude),
- TGO3 – Freisetzung tritiumhaltiger Abwässer in die Umwelt aufgrund einer Fehlbedienung des Tritium-Aufbereitungs-Systems,

- THO1 – Doppelendiger Bruch einer Wasserstoffleitung am Ausgang des Elektrolyseurs; unmittelbare Tritiumfreisetzung in die Räume des Wasserdetriierungssystems,
- TWO1 – Leck an einem Tank des Wasserdetriierungssystems mit hochradioaktivem Inhalt

betrachtet und den folgenden drei Szenarien zugeordnet (vgl. Abb. 2.5):

- INTL-1 Gasfreisetzung aus dem inneren Tritiumkreislauf,
- OUTL-1 Gasfreisetzung aus dem äußeren Tritiumkreislauf,
- OUTL-2 Freisetzung tritiumhaltigen Wassers.

Diese werden dann jeweils diskutiert. Neben kurzen Beschreibungen der Szenarien werden auch Werte für eventuelle radioaktive Freisetzungen (innerhalb der Anlage und ggf. nach außerhalb) angegeben.



**Abb. 2.5** Zuordnung der Auslösenden Ereignisse im Tritiumkreislauf (TGG1, TGO1, TGO3, THO1 und TWO1) zu Szenarien nach /SHA 23/

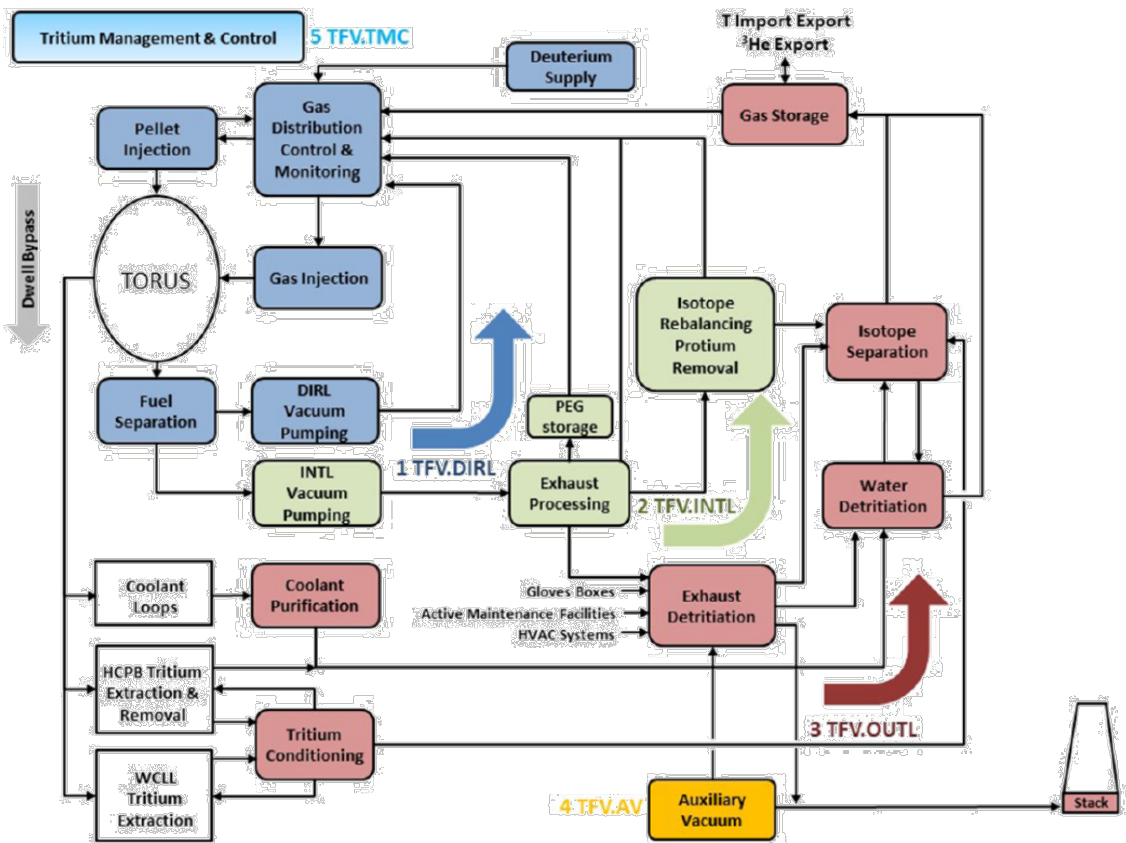


Abb. 2.6 Schematischer Überblick über den Tritiumkreislauf nach /DAY 22/

blau – interner Recyclingkreislauf  
 grün – innerer Tritiumkreislauf  
 rot – äußerer Tritiumkreislauf

### 2.3.1 INTL-1 – Gasfreisetzung aus dem inneren Tritiumkreislauf (TGG-1)

Als Ausgangsszenario wird in /SHA 23/ eine Gasfreisetzung aus dem Isotopenausgleichs- und Protiumextraktionssystem (Isotope Rebalancing and Protium Removal System, IRPR) in geschlossene Räume postuliert. Das IRPR wurde für die Analyse ausgewählt, da es mit 556 g T<sub>2</sub> das größte Tritiuminventar des inneren Tritiumkreislaufs aufweist.

Da noch keine konkreten Baudaten für DEMO existieren, wurden zwei Raumvolumina willkürlich festgelegt: 100 m<sup>3</sup> (zur Repräsentation eines „kleinen“ Raums) und 10.000 m<sup>3</sup> (zur Repräsentation eines „großen“ Raums). Für die Berechnungen wurde von einer schnellen vollständigen Durchmischung des Tritiums mit der Raumluft ausgegangen. Auf dieser Grundlage wurden die Auswirkungen auf in den betroffenen Räumen befindliches Personal ermittelt. Zusätzliche Gefahren wie z. B. Wasserstoffexplosionen wurden bei den Betrachtungen nicht berücksichtigt.

Für den Raum mit 100 m<sup>3</sup> ergibt sich laut /SHA 23/ eine Aktivität von  $1,98 \cdot 10^{15}$  Bq/m<sup>3</sup>. Der Grenzwert von 50 mSv für eine eventuell im Raum befindliche Person wird nach 34 Sekunden erreicht.

Für den größeren Raum mit 10.000 m<sup>3</sup> wird in /SHA 23/ eine (höhere) Aktivität von  $1,98 \cdot 10^{16}$  Bq/m<sup>3</sup> genannt. Nach Rücksprache mit einem der Autoren handelt es sich hierbei um einen Druckfehler, der korrekte Wert ist  $1,98 \cdot 10^{13}$  Bq/m<sup>3</sup>. Der Grenzwert von 50 mSv für eine eventuell im Raum befindliche Person wird entsprechend den Simulationen nach 5 Minuten und 36 Sekunden erreicht.

Die Autoren ziehen – insbesondere aus der sehr kurzen Zeit bis zum Erreichen einer Dosis von 50 mSv im kleineren Raum – die Schlussfolgerung, dass eine leistungsfähige Lüftungsanlage erforderlich ist, um das Risiko für das Personal so gering wie möglich zu halten.

### **2.3.2 OUTL-1 – Gasfreisetzung aus dem äußeren Tritiumkreislauf (TGO-1 + THO-1)**

Für dieses Szenario wird in /SHA 23/ von einer nur bei Konzepten mit WCLL-Blanket relevanten Freisetzung aus dem Wasserdetriierungssystem (Water Detritiation System, WDS) ausgegangen. Diese Wahl erscheint eher ungeeignet, da das Tritiuminventar dieses Systems mit nur 35 g um einen Faktor 17 geringer ist als im Isotopenseparationsystem.

Die Autoren begründen Ihre Wahl damit, dass bei dem gewählten Szenario einerseits die Tritiumkonzentration beim Bruch der vom Elektrolyseur abgehenden Leitung höher sei und andererseits zusätzliche nicht-radiologische Gefahren eine Rolle spielen. Eine über diese pauschalen Aussagen hinausgehende Erläuterung wird in /SHA 23/ jedoch nicht gegeben.

Bisher wurde für dieses Szenario auch noch keine Ereignisablaufanalyse durchgeführt, da das Design des Elektrolyseurs noch nicht festgelegt ist. Die Autoren empfehlen, sobald dieses Design feststeht, eine Sicherheitsanalyse analog zu anderen Industriebereichen durchzuführen. Auch diese Aussage ist etwas irritierend, da in „anderen Industriebereichen“ der Fokus auf konventionellen Gefahren (z. B. Explosionen) liegen dürfte und nicht auf den für einen Tritiumkreislauf relevanten radiologischen Aspekten.

### **2.3.3 OUTL-2 – Freisetzung tritiumhaltigen Wassers (TGO-3 + TWO-1)**

Das dritte in /SHA 23/ diskutierte Szenario ist eine Freisetzung von Wasser aus dem Tank des Wasserdetriitierungssystems. Über die Daten dieses Systems bei DEMO liegen noch keine ausreichenden Informationen vor. Von JET ist bekannt, dass die anfängliche Aktivität des Wassers im Bereich von einigen GBq pro Liter lag, mit einer maximalen Aktivität von bis zu 185 GBq/l. Das Volumen des entsprechenden Lagertanks bei ITER betrug 90 m<sup>3</sup>.

Für das Szenario der Wasserfreisetzung betrachten die Autoren drei radiologische Gefährdungsszenarien:

- Inhalation von Wasserdampf,
- Trinken des Wassers und
- Kontamination durch Kontakt.

Dabei werden jeweils zwei Varianten betrachtet, eine mit einer Wasseraktivität von 10 GBq/l und eine mit 100 GBq/l. Die von JET bekannte maximale Aktivität von 185 GBq/l wird jedoch nicht als konservatives Szenario berücksichtigt.

#### **Inhalation von Wasserdampf**

Für die Betrachtungen zur Inhalation von Wasserdampf wurde von einer Luftfeuchtigkeit von 100 % und einer Raumtemperatur von 25 °C ausgegangen. Außerdem wurde die Annahme gemacht, dass der gesamte Wasserdampf als HTO vorliegt (d. h. in Form von Wassermolekülen mit jeweils einem Tritiumatom/-kern). Bei einer Aktivität des Wassers von 10 GBq/l wird der Grenzwert von 50 mSv durch Inhalation nach 10 Stunden und 42 Minuten erreicht. Bei 100 GBq/l nach 1 Stunde und 4 Minuten. Den Berechnungen liegt ein Atemzeitvolumen von 25 l/min zugrunde, das als plausibler Wert innerhalb des Variationsbereichs von 10 l/min bis 60 l/min angesehen wird.

#### **Trinken des Wassers**

Würde eine Person das Wasser trinken, wäre im Szenario mit einer Aktivität von 10 GBq/l der Grenzwert von 50 mSv mit einer Wassermenge von 277,78 ml (also etwa einem handelsüblichen Wasserglas) erreicht, bei 100 GBq/l mit einer Wassermenge von 27,78 ml (also ungefähr einem Schnapsglas).

## Kontamination/Kontakt

Hinsichtlich der Aufnahme von HTO über die Haut stützen die Autoren sich auf einen Bericht der Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC) zu „Health Effects, Dosimetry and Radiological Protection of Tritium“ /CNS 10/. Dort wird die Aufnahme von HTO als Wasserdampf und als Flüssigkeit über die Haut diskutiert. Die Aufnahme von Wasserdampf über die Haut wird in /CNS 10/ auf Basis der wenigen verfügbaren experimentellen Daten mit etwa der Hälfte der Aufnahme durch Inhalation abgeschätzt. Aufgrund der ebenfalls dort zu findenden Aussage, dass die Aufnahme von HTO über die Haut aus Wasserdampf (0,018 mg/cm<sup>2</sup>/min) im Bereich der Spannweite der Aufnahme aus flüssigem Wasser (0,04 – 0,065 mg/cm<sup>2</sup>/min) liegt, schließen die Autoren von /SHA 23/, dass sie für die Kontamination durch Kontakt mit dem tritiumhaltigen Wasser die Hälfte der Aufnahme durch Inhalation ansetzen können. Diese beziffern sie mit 62,3 µSv/min bzw. 623 µSv/min (für Wasser mit einer Aktivität von 10 GBq/l bzw. 100 GBq/l). Die Plausibilität dieser Werte und der zugrundeliegenden Annahme konnte von der GRS nicht verifiziert werden.

Wenn man nun wieder den Grenzwert von 50 mSv zugrunde legen würde, käme man für die Kontamination durch Kontakt mit dem tritiumhaltigen Wasser auf Zeiten von knapp 14 Stunden bzw. von 1 Stunde 20 Minuten (für Wasser mit einer Aktivität von 10 GBq/l bzw. 100 GBq/l).

Zur Risikominimierung schlagen die Autoren von /SHA 23/ die folgenden Maßnahmen vor:

- Minimierung des für die Aufbereitung im WDS in aufkonzentrierter Form gelagerten tritiumhaltigen Wassers,
- Installation der Lagertanks unterhalb des Geländeniveaus (z. B. in einem speziellen Kellerraum), so dass auslaufendes Wasser lokalisiert bleibt,
- Aufstellung der Tanks in einer mit einem Leckagewarnsystem ausgestatteten Wanne,
- Ausstattung des Lagerraums mit einem Sumpf und einer Sumpfpumpe, um Freisetzungen aus der Wanne mit minimalem Personalaufwand beherrschen zu können,

- Anbringung von Strahlungs- und Sauerstoffsensoren oberhalb der Tanks zur Leckageerkennung,
- Ausstattung der Tanks mit einem flexiblen oder belüftbaren Deckel.

Bis auf die letzten beiden Punkte erscheinen diese Vorschläge plausibel und geeignet, das aus dem Szenario OUTL-2 resultierende radiologische Risiko für das Anlagenpersonal zu reduzieren. Inwiefern Strahlungs- und insbesondere Sauerstoffdetektoren zu einer Reduzierung des Risikos beitragen können, ist nicht unmittelbar einsichtig, da bei einer Leckage lediglich der Tank als „Abschirmung“ wegfällt und ohne Elektrolyse, für die keine Ursache erkennbar ist, kein erhöhter Sauerstoffanfall zu erwarten ist. Ebenso unklar ist der Nutzen flexibler bzw. belüftbarer Tankdeckel.

## **2.4            Zwischenfazit**

Zusammenfassend ist festzustellen, dass seit den Recherchen zu /GRS 23/ keine großen Fortschritte hinsichtlich Ereignisablaufanalysen erzielt wurden. Für viele der in /PIN 17/ aufgelisteten auslösenden Ereignisse und ebenso für Einwirkungen von außen wurden nach wie vor keine Analysen veröffentlicht. Andererseits sind die zwischenzeitlich veröffentlichten und in diesem Kapitel zusammengefassten Untersuchungen von einer geringen Detailtiefe geprägt. Daher ist auf Basis der verfügbaren Untersuchungen derzeit keine abschließende Risikobewertung der bei Fusionskraftwerken nach dem Tokamak-Prinzip (d. h. den DEMO-Konzepten) zu unterstellenden Störfälle möglich. Dies gilt sowohl hinsichtlich technischer Aspekte der Ereignisabläufe als auch hinsichtlich der potenziell resultierenden radioaktiven Freisetzungen bzw. der Strahlenbelastung des Personals.

### 3 Trägheitsfusionsanlagen-Konzepte

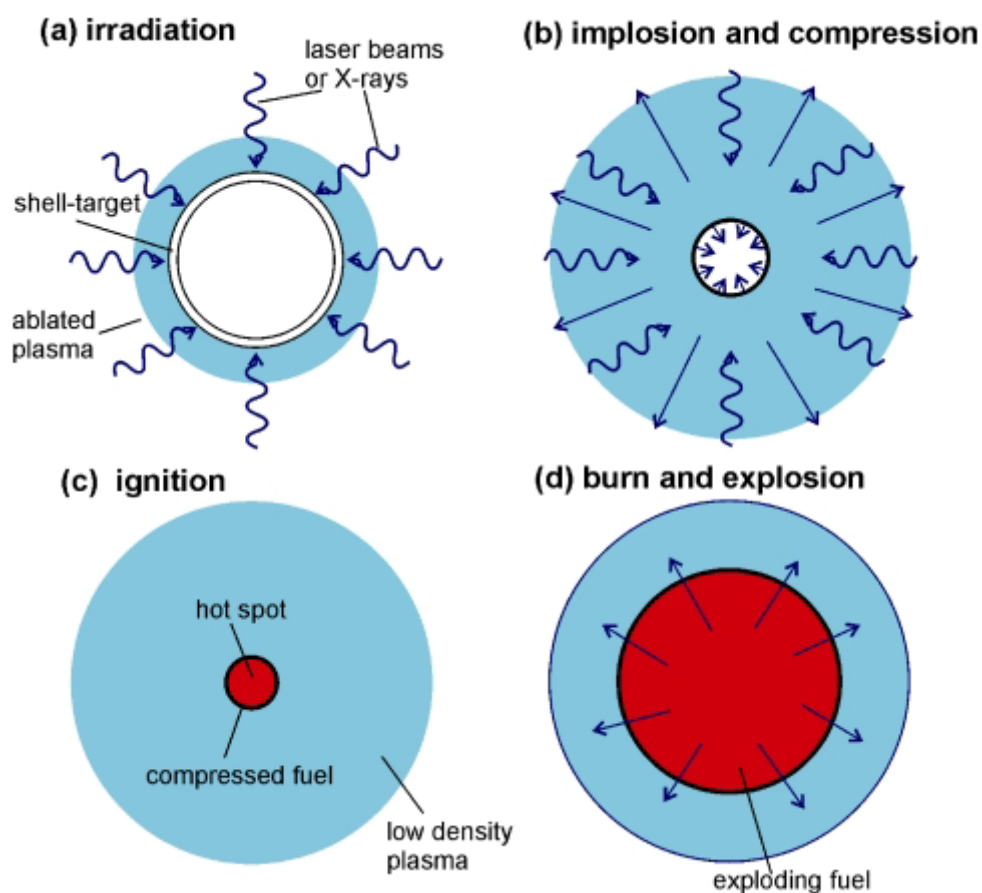
Theoretisch stehen eine Reihe verschiedener Kernreaktionen zur Verfügung, mit denen sich Fusionsenergie gewinnen ließe. Aus praktischen Gründen wird allerdings am häufigsten die Reaktion verfolgt, bei der je ein Deuterium- und ein Tritium-Kern unter Abgabe eines Neutrons zu einem Heliumkern verschmelzen. Bei den dazu erforderlichen Temperaturen und Dichten liegt das Gasgemisch aus Deuterium und Tritium als Plasma vor. Damit eine selbsterhaltende Kernfusionsreaktion möglich wird, muss das sogenannte Lawson-Kriterium erfüllt sein:  $n \cdot \tau \cdot T > 6 \cdot 10^{28} \text{ s} \cdot \text{K}/\text{m}^3$ . Dabei ist  $n$  die Teilchendichte,  $\tau$  die Einschlusszeit und  $T$  die Temperatur. Bei einer gegebenen Temperatur muss also entweder eine lange Einschlusszeit oder eine hohe Dichte erreicht werden. Die hohe Dichte wird mit dem Ansatz der Trägheitsfusion verfolgt.

Im Folgenden werden zuerst kurz die Grundlagen der Trägheitsfusion (inertial confinement fusion, ICF) erklärt. Nachfolgend werden die Herausforderungen bei der großtechnischen Nutzung der Trägheitsfusion beschrieben und anschließend die aktuell verfolgten Konzepte für Trägheitsfusionsanlagen, mit besonderem Augenmerk auf laserinduzierter Trägheitsfusion, dargestellt. Die Informationen basieren hierbei auf öffentlich zugänglichen Quellen, wie wissenschaftliche Veröffentlichungen, Pressemitteilungen etc. Das Zitieren von Aussagen und Einschätzungen hinsichtlich der Realisierbarkeit von Konzepten oder der weiteren Entwicklung bedeutet nicht, dass die GRS sich diesen inhaltlich anschließt. Für die bereits in /GRS 23/ beschriebenen Konzepte werden vorrangig neue Informationen dargestellt.

#### 3.1 Grundlagen der Trägheitsfusion

Die Trägheitsfusion verwendet millimetergroße Kapseln eines Deuterium/Tritium (DT-) Gemischs, welche durch Laser-, Röntgen- oder Teilchenstrahlen (sogenannte Treiber) zur thermonuklearen Reaktion gebracht werden. Solche Brennstoffkapseln (BK) oder engl. Targets lassen sich z. B. dadurch herstellen, dass Hohlkugelchen bei erhöhter Temperatur einer Wasserstoffatmosphäre ausgesetzt werden. Die Gesamtmasse an Wasserstoff pro Target beträgt nur einige Milligramm. Bei sphärisch symmetrischer Bestrahlung mit Laser- oder Teilchenstrahlen großer Intensität wird die äußere Hülle der

BK schlagartig ablatiert<sup>5</sup>. Durch den Rückstoß wird eine Schockwelle angeregt, die in das Kapselinnere läuft und dabei den Brennstoff komprimiert und erhitzt, so dass im Zentrum Kompression und Temperatur am höchsten sind und die Zündung erfolgt. Um die Zündung zu initiieren, muss die Temperatur im Zentrum 10 keV (entsprechend ca.  $11 \cdot 10^7$  K) übersteigen und der Wasserstoff muss auf eine Dichte von  $300 \text{ g/cm}^3$  komprimiert werden. Der Abbrand des Brennstoffs erfolgt dann vom Zentrum ausgehend. In Abb. 3.1 ist der Ablauf schematisch dargestellt. Die insgesamt freigesetzte Energie (zu 80 % durch Neutronen) wird in einem Reaktorgefäß aufgefangen und kann in einem thermischen Kreislauf genutzt werden. /DPG 25/



**Abb. 3.1** Schematische Darstellung der Phasen der Laserfusion /BAD 12/

Im Gegensatz zum stationären oder Langpulsbetrieb, wie bei der auf magnetischem Einschluss basierenden Fusion, nutzt die Trägheitsfusion kurze, schnelle Impulse bei einer optimierten Frequenz, um die Bedingungen für die Kernfusion zu erreichen. Da die

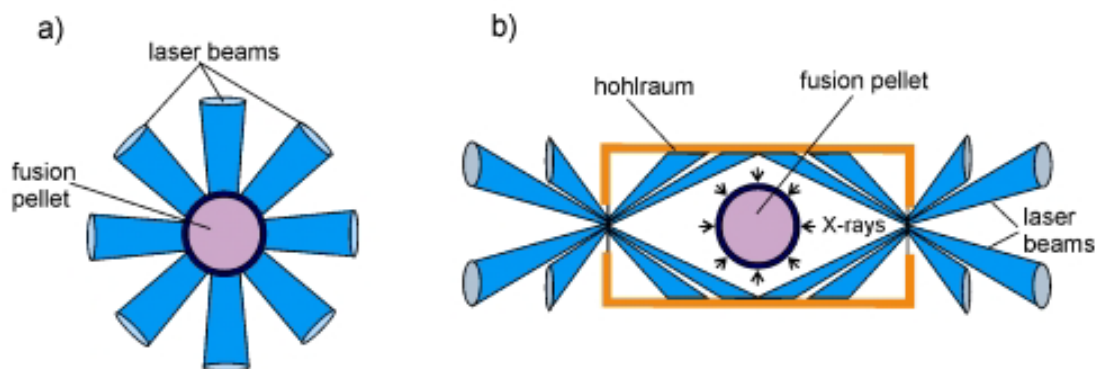
<sup>5</sup> D. h. abgelöst oder abgesprengt.

Bedingungen nur für eine sehr kurze Zeit, einige Nanosekunden, erreicht werden, wird das Plasma aufgrund der Massenträgheit zusammengehalten und es wird kein Magnetkäfig benötigt. /DPG 25/

Um die erforderliche sphärische Kompression der BK zu erreichen, gibt es verschiedene Verfahren:

### Direkter Antrieb (Direct Drive)

Beim direct drive wird die sphärische Kompression der BK durch die gleichmäßige Bestrahlung der Oberfläche mit Laserlicht erreicht (siehe a) in Abb. 3.2). Aufgrund der hydrodynamischen Instabilität der Beschleunigung des dichteren BK-Materials durch das dünnere Plasma kann es zur Ausbildung einer Rayleigh-Taylor Instabilität kommen. Trotz der stabilisierenden Wirkung der Wärmeleitung auf der Target-Oberfläche, darf die Inhomogenität der Strahlungsdichte auf der Target-Oberfläche nicht größer sein als 1 %, da sonst die Kompression zu ungleichmäßig erfolgt und es zu einer Vermischung von warmem und kaltem Brennstoff kommt. Um dies zu vermeiden, werden viele symmetrisch angeordnete Laserstrahlen überlappend auf die BK fokussiert. Außerdem müssen die BK beim direkten Antrieb sowohl während der Injektion in die Fusionskammer als auch während der Flugphase vor einer Erwärmung oder Verformung geschützt werden. /BAD 12/



**Abb. 3.2** Schematische Darstellung des a) direkten Antriebs und b) indirekten Antriebs der Laserfusion /BAD 12/

### Indirekter Antrieb (Indirect Drive)

Beim indirect drive wird die BK im Zentrum eines Metallzylinders eingebaut, welcher dann mit Laserlicht oder Ionen bestrahlt wird (siehe b) in Abb. 3.2). Die spektrale

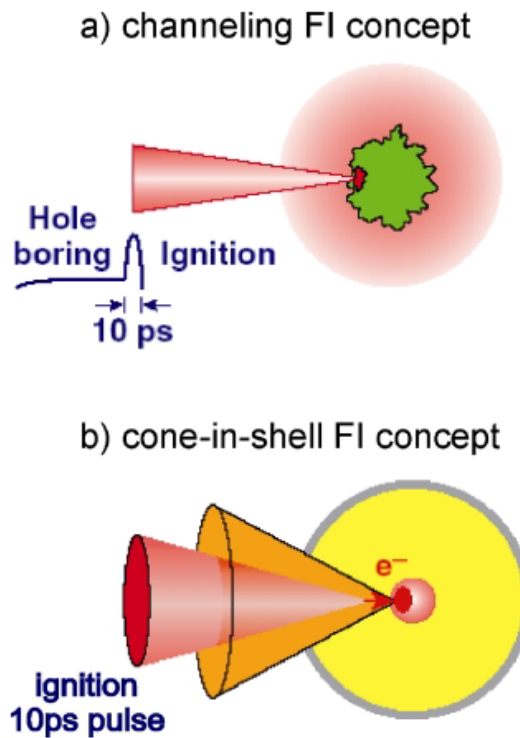
Verteilung der elektromagnetischen Strahlung ergibt sich durch die Temperatur der Wände und wird Schwarzkörper- oder Hohlraumstrahlung genannt. Um die Zündung des Brennstoffs zu erreichen, müssen mindestens 70 % der eingestrahnten Laserenergie umgewandelt werden. Dies kann erreicht werden, indem Wandmaterialien mit hoher Kernladungszahl (z. B. Gold, Gold-Gadolinium-Mischungen) verwendet werden, da diese über einen hohen Absorptionsquerschnitt für hochenergetische Photonen verfügen und somit die absorbierte Laserenergie effizient in Röntgenstrahlung umwandeln. Die Röntgenstrahlen erzeugen einen gleichmäßigen Ablationsdruck, der die BK komprimiert und implodieren lässt, was wiederum zur Zündung und Energiegewinnung führt. Die Massenablationsrate ist beim indirekten Antrieb aufgrund des tieferen Eindringens der Röntgenstrahlen höher als beim direkten Antrieb und führt zu einer höheren hydrodynamischen Effizienz (Verhältnis von Implosionsenergie zu absorbierter Energie). Allerdings benötigt ein indirekter Antrieb auch eine präzise Ausrichtung der BK bei hohen Wiederholungsraten und hat eine intrinsisch geringere Verstärkung aufgrund des Zwischenschritts der Energieumwandlung von Laser- in Röntgenstrahlen. /BAD 12/

### **Schnellzündung (Fast-Ignition, FI)**

Die sphärische Komprimierung des Targets kann mit dem Konzept der Schnellzündung umgangen werden. Bei diesem Ansatz wird der Brennstoff, der durch einen langgepulsten (Nanosekunden, ns) Treiber (Laserstrahlen, Röntgenstrahlen) vorkomprimiert wurde, durch einen kurzgepulsten (Pikosekunden, ps) ultra-intensiven ( $\approx 10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>) Teilchenstrahl gezündet. Die Vorteile sind eine höhere Verstärkung, eine geringere Gesamtenergie des Treibers, reduzierte Symmetrieanforderungen und Flexibilität bei den Kompressionstreibern sowie dass Kompression und Zündung voneinander getrennt sind und damit die Ausbildung einer Rayleigh-Taylor-Instabilität vermieden wird. Allerdings bedarf es einer effizienten Erzeugung eines Teilchenstrahls mit extremen Parametern und dessen Kopplung an den Brennstoff. /BAD 12/

Im ursprünglichen Konzept der Schnellzündung (siehe a) in Abb. 3.3) werden durch den sehr intensiven Teilchen-/Laserstrahl die Plasmaelektronen relativistisch in Richtung des Strahls beschleunigt, was wiederum ein Magnetfeld erzeugt, welches den Strahl komprimiert und einen Kanal niedriger Plasmadichte erzeugt, durch den der Teilchen-/Laserstrahl propagieren kann (aufgrund der hohen Plasmadichte würde der Strahl sonst reflektiert). Die hochenergetischen Elektronen geben dann ihre Energie an das bereits komprimierte Plasma im Zentrum der BK ab und ermöglichen so die Zündung.

Entscheidende Herausforderungen für dieses Schema sind die effektive Bildung des Kanals und der Transport des ultraintensiven Pulses durch ihn. /DPG 25/, /BAD 12/



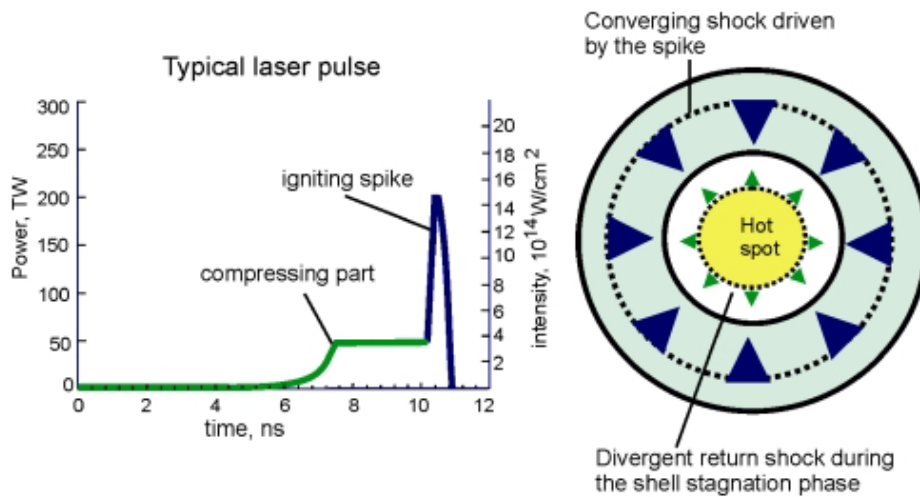
**Abb. 3.3** Schematische Darstellung der grundlegenden Konzepte der Schnellzündung a) ursprüngliches Konzept und b) Kegel-in-Hülle-Konzept /BAD 12/

In einem neueren alternativen Konzept (siehe b) in Abb. 3.3) wird ein Hohlkegel aus einem Material mit einer hohen Ordnungszahl verwendet, der in die BK eingesetzt wird. Der Kegel bietet einen offenen Pfad für den ultraintensiven Teilchen-/Laserstrahl und ermöglicht dessen Fokussierung im Inneren des Kegels sowie die Erzeugung schneller Elektronen an dessen Spitze, sehr nahe am dichten Plasma, das durch die kegelgeführte Implosion erzeugt wird. Das Kegelkonzept erleichtert den Transport des Zündstrahls, andererseits kompliziert es das Targetdesign und stört die sphärische Symmetrie der Implosion. /BAD 12/

### **Schockzündung (Shock-Ignition)/DPG 25//DPG 25/**

Die Schockzündung stellt eine Zwischenvariante zwischen (in)direct drive und Schnellzündung dar. Es ist ein zweistufiger Ansatz, bei dem am Ende der Kompressionsphase eine starke, konvergierende Schockwelle ausgelöst wird, um den Brennstoff zu zünden. Sowohl die Kompression des DT-Targets als auch die Schockwelle lassen sich durch

einen einzelnen, maßgeschneiderten Laserpuls erzeugen. Dieser besteht aus einem nanosekundenlangen Peak bei moderaten Intensitäten, gefolgt von einem kurzen, intensiven Spike (siehe Diagramm in Abb. 3.4), der eine starke konvergierende Schockwelle mit einem Anfangsdruck von etwa 300 Mbar (ca.  $3 \cdot 10^{13}$  Pa) erzeugt. Dieser Druck wird durch die Konvergenz verstärkt und zusätzlich erhöht, wenn die konvergierende Schockwelle auf die vom Zentrum reflektierte Schockwelle trifft. Der Brennstoff wird daraufhin weiter erhitzt und zündet. In Abb. 3.4 ist das Verfahren der Schockzündung dargestellt.

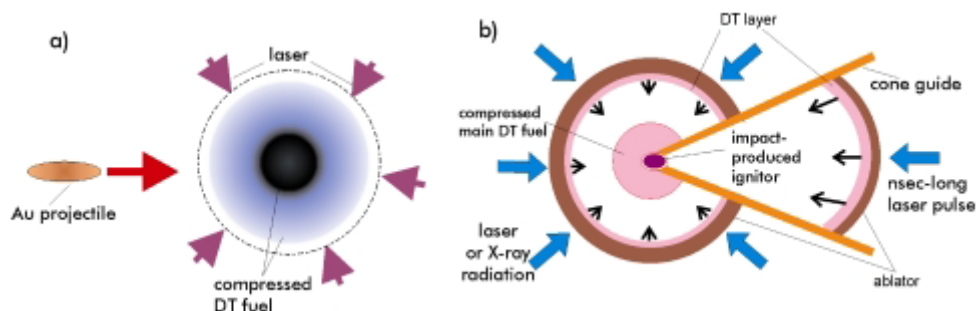


**Abb. 3.4** Darstellung der Schockzündung /BAD 12/

Die Hauptvorteile dieses Verfahrens sind die relativ geringe Laserleistung (200 – 300 TW) und Energie (200 – 300 kJ), die für die Zündung benötigt werden, ein hoher Energiegewinn und die Verwendung konventioneller Lasertechnologie und eines relativ einfachen Targets. Es gibt jedoch mehrere ungelöste Probleme, insbesondere die effiziente Erzeugung eines hochsymmetrischen, starken Schocks mit einer geringen Anzahl von Laserstrahlen, die präzise zeitliche Steuerung des Schocks, die Wechselwirkung des Schocks mit der komprimierten Hülle und dem abprallenden divergenten Schock sowie die mögliche Beeinträchtigung der Laser-Plasma-Kopplung bei der erforderlichen hohen Intensität aufgrund parametrischer Plasmastabilitäten. Des Weiteren ist die Physik der Laser-Plasma-Wechselwirkung bei Laserintensitäten, wie sie für den Schockzündungs-Spike typisch sind, hochgradig nichtlinear und weitgehend unerforscht. /BAD 12/, /ILI 26/

## Stoßzündung (Impact Ignition)

Bei der Stoßzündung kollidiert ein etwa 1 µg schweres Mikroprojektil aus einem Material mit hoher Ordnungszahl (z. B. Gold), das auf etwa  $5 \times 10^8$  cm/s beschleunigt wird, mit dem komprimierten DT-Brennstoff. Durch die Kollision kollabiert das Projektil rasch auf hohe Dichten und ein großer Teil seiner Energie wird innerhalb kürzester Zeit (ca.  $10^{-11}$  s) auf den Brennstoff übertragen. Dadurch wird der Brennstoff gezündet. Das Verfahren ist in Abb. 3.5 a) dargestellt. Bei einem neueren Ansatz der Schockzündung wird der komprimierte DT-Hauptbrennstoff durch den Aufprall eines weiteren Teils separat implodierten DT-Brennstoffs gezündet, der in einem hohlen konischen Target auf Geschwindigkeiten von  $\approx 10^8$  cm/s beschleunigt wird (siehe b) in Abb. 3.5). Seine kinetische Energie wird beim Aufprall auf den Hauptbrennstoff direkt in thermische Energie umgewandelt ( $T > 5$  keV). Dieser selbsterhitzte Teil dient als Zünder. Die Zünderhülle wird typischerweise mit einem ns-Laserpuls mit Intensitäten  $> 10^{15}$  W/cm<sup>2</sup> und kurzer Wellenlänge (z. B. 0,35 µm) bestrahlt, um Ablationsdrücke zu erzeugen, die das DT-Projektil auf über 100 Mbar verdichten. Die bei der Stoßzündung für die Kompression und Zündung des DT-Brennstoffs benötigte Laserenergie wird auf etwa 200 – 300 kJ geschätzt, was deutlich geringer wäre als beim (in)direkten Antrieb.



**Abb. 3.5** Schema der Stoßzündung mit a) einem Projektil hoher Ordnungszahl und b) DT-Plasma-Projektil /BAD 12/

Die Vorteile der Stoßzündung im Vergleich zum (in)direkten Antrieb sind die deutlich geringere Laserenergie und der höhere Energiegewinn. Im Vergleich zur Schnellzündung liegt der wesentliche Vorteil in der einfacheren Physik und dem Verzicht auf einen Kurzpuls-Multi-Petawatt-Laser. Die größte Herausforderung bei diesem Verfahren besteht jedoch darin, ein Projektil mit einer Masse von mehreren Mikrogramm und hoher Dichte ( $\rho \geq 50$  g/cm<sup>3</sup>) auf eine Geschwindigkeit von  $> 10^8$  cm/s zu beschleunigen. /BAD 12/

### **3.2 Herausforderungen bei der großtechnischen Nutzung der Trägheitsfusion**

Die Ergebnisse der National Ignition Facility (NIF) des Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) in den USA aus den Jahren 2022 – 2025 stellen einen Machbarkeitsnachweis für die Trägheitsfusion dar. Obwohl das Grundkonzept der Zündung eines Targets im Labor und die Erzeugung von mehr Fusionsenergie, als dem Target zugeführt wurde, gezeigt wurde, ist noch erhebliche Forschungsarbeit nötig, um diesen Ansatz für ein wirtschaftliches und praktikables Fusionskraftwerk nutzen zu können. Das bedeutet, auch wenn einige Komponenten in Laborumgebungen validiert wurden, weisen sie im Vergleich zu endgültigen, kommerziellen Komponenten oder Systemen eine geringe Technologiereife auf und müssen noch als Prototypen in einem angemessenen Maßstab in ICF-relevanten Umgebungen (bei oder nahe der vollen Schussrate und/oder Lebensdauer oder in simulierten Extremumgebungen) validiert werden. Dies spiegelt auch die in Abb. 3.6 abgebildete Tabelle wider, welche den Technologiereifegrad für sieben essenzielle Aspekte (z. B. Massenproduktion von Targets, Reaktionskammer-Design und Erste Wand Materialien) für unterschiedliche Trägheitsfusionskonzepte enthält. Um die Trägheitsfusion wirtschaftlich nutzen zu können, wird nicht nur ein praktikables ICF-Design benötigt, es müssen auch eine Reihe von Lösungen gefunden werden. /DOE 22/

Grundsätzlich muss die Targetverstärkung so hoch sein, dass die erzeugte Energie deutlich höher ist als der Energiebedarf für die Treiber und das restliche Kraftwerk. Beispielsweise sind im Bereich des Energiebedarfs für den Betrieb der Laser und der zugehörigen Anlagenkomponenten deutliche Verbesserungen erforderlich, da davon ausgegangen wird, dass das Lasersystem den größten Stromverbraucher des Kraftwerks (85 – 90 %) darstellt. Für den wirtschaftlichen Erfolg einer ICF-Anlage im Produktionsmaßstab sind außerdem Fortschritte in der Laserentwicklung (z. B. Laserleistung, Lebensdauer > 30 Jahre) notwendig. Des Weiteren gibt es kein bewährtes Verfahren zur effizienten Umwandlung von Fusionsenergie (unabhängig vom Fusionskonzept) in Strom. Die Wärmeübertragung in einem Kernspaltungsreaktor ist gut erforscht, die Temperaturgradienten sind dort jedoch weniger ausgeprägt. Ein effektives Verfahren zur Wärmeübertragung in einem Fusionsreaktor muss erst noch demonstriert werden. /CAL 24/

<i>IFE Concepts</i> →	Laser Indirect-Drive (LID)	Laser Direct-Drive (LDD), including Shock Ignition (SI)	Fast Ignition (FI)
<i>Critical aspects for IFE development</i> ↓			
Demonstration of ignition and reactor-level gain	4	3	2
Manufacturing and mass production of reactor-compatible targets	2	2	2
Driver technology at reactor-compatible energy, efficiency, and repetition rate	4	4	3
Target injection, tracking, and engagement at reactor-compatible specifications	2	2	2
Chamber design and first wall materials	1	1	1
Maturity of Theory and Simulations	3	3	2
Availability of diagnostic capabilities for critical measurements	3	3	2

**Abb. 3.6** Bewertung des Technologiereifegrads (Technology Readiness Level, TRL) sieben entscheidender Aspekte für drei Trägheitsfusionskonzepte /DOE 22/

Weiterhin muss die erforderliche Fusionswiederholungsrate demonstriert werden, ebenso wie die Erzeugung aufeinanderfolgender Fusionsereignisse ohne Beeinträchtigung aus vorherigen Ereignissen. Um ein Kraftwerk im 1.000-MW-Bereich zu betreiben, wird im Allgemeinen eine Wiederholrate von 10 – 15 Hz benötigt, abhängig von der Fusionsausbeute pro Target. Ein weiterer Punkt ist die Herstellung der Brennstoffkapseln oder Hohlraumtargets. Die hohe Wiederholungsrate bedeutet, dass täglich eine große Menge kostengünstiger Targets produziert werden muss. Die Massenproduktion von BK (für ein kommerzielles Kraftwerk zur Aufrechterhaltung des Betriebs sind etwa  $10^6$  BK täglich notwendig) muss Verunreinigungen minimieren und die Material- sowie Designspezifikationen erfüllen. Sowohl die BK als auch die Hohlraumtargets müssen die erforderliche Qualität aufweisen. Wenn als Brennstoff Tritium verwendet werden soll, so werden eine Methode zur Erzeugung der notwendigen Tritiummenge im Blanket sowie geeignete Methoden der Tritiumrückgewinnung und des -recyclings benötigt. Alle

Systeme des Tritiumkreislaufs müssen noch entwickelt und demonstriert werden. Zudem muss die Energiekopplungseffizienz erhöht werden, d. h. wieviel der eingestrahlten Laserenergie vom Target absorbiert wird (ein Hohlraumtarget absorbiert nur etwa 10 – 15 % der Laserenergie). Experimente und Simulationen bestätigen, dass für das direct drive Verfahren eine kürzere Laserwellenlänge die Effizienz der Laserkopplung an die implodierende BK verbessert und gleichzeitig die Intensitätsschwelle für unerwünschte Laser-Plasma-Instabilitäten erhöht /NRC 25a/United States Nuclear Regulatory Commission, Fusion Program Roadmap, online: Fusion Program Roadmap, November 2025.

/OBE 15/. Außerdem wird ein automatisiertes System benötigt, um die Targets sequenziell in die Kammer zu befördern, aber auch Reaktionsprodukte (z. B. Targettrümmer) zu entfernen. Die Brennstoffzufuhr und die Abfuhr von Verunreinigungen und Fusionsprodukten müssen so erfolgen, dass der Betrieb wirtschaftlich aufrechterhalten werden kann.

Weiterhin müssen die für unterschiedliche Systeme und Komponenten verwendeten Materialien den extremen Temperatur- und Druckbedingungen der ICF-Reaktionskammer standhalten. Diese Materialien müssen außerdem den Neutronen-, Gamma- und Alpha-Strahlungen sowie den damit verbundenen Strahlenschäden widerstehen. Darüber hinaus wirken sich sowohl die Materialwahl als auch die Konstruktion auf die Austauschrate von Komponenten und die erforderlichen Stilllegungs-/Endlagerprozesse aus. Es ist zu erwarten, dass bestimmte Anlagenkomponenten in kürzeren Abständen instandgesetzt oder ersetzt werden müssen, womit auch die Entsorgung dieser Abfälle berücksichtigt werden muss. Komponenten, die hohen Neutronenflüssen (Neutronenflüsse in Fusionsreaktoren können im Bereich  $10^{18} - 10^{20} \text{ n m}^{-2}\text{s}^{-1}$  liegen /CHA 20/) ausgesetzt und daher aktivierungsgefährdet sind, erfordern besondere Aufmerksamkeit hinsichtlich Material und Konstruktion. Aufgrund zu erwartender hoher Strahlungswerte muss eine Wartung im laufenden Betrieb, eine Demontage oder eine Stilllegung ferngesteuert erfolgen. Mit zunehmender Dimensionierung der Komponenten steigt hierbei die Herausforderung. /CHA 20/

Ein Großteil der Fusionsforschung wurde in der Vergangenheit an Universitäten und nationalen Laboratorien mit öffentlichen Geldern durchgeführt. In den letzten Jahren wurden mehrere Fusionsunternehmen gegründet, die durch eine Kombination aus privaten Investitionen und öffentlichen Mitteln finanziert werden mit dem Ziel, möglichst schnell eine Trägheitsfusions-Pilotanlage zu errichten. Eine Zusammenarbeit zwischen

öffentlich finanzierten Institutionen und privaten Unternehmen könnte ein erfolgversprechender Weg sein, da die öffentlichen Einrichtungen jahrzehntelange Erfahrung, Wissen und Instrumente einbringen, während die privaten Unternehmen die Start-up-Kultur mitbringen, um schnell zu agieren und dabei höhere technische Risiken für einen raschen Fortschritt in Kauf zu nehmen. So könnten die notwendigen Fortschritte erzielt werden, um Fusionsenergie so schnell wie möglich ins Stromnetz zu bringen.  
/CAL 24//CAL 24//CAL 24/

### **3.3 Aktuelle Trägheitsfusions-Konzepte**

Wie bereits erwähnt war der Erfolg der NIF ein wichtiger Meilenstein für die lasergetriebene Fusion. Allerdings lag beispielsweise der Energiebedarf für das Lasersystem bei etwa 300 MJ (ohne den Energiebedarf der weiteren Systeme), also 100-mal höher als die freigesetzte Energie. Für einen Nettoenergieüberschuss müssen Effizienzsteigerungen des Gesamtsystems erzielt werden, beispielsweise durch energieeffizientere Laser (Wirkungsgrad der Umwandlung von elektrischer in optische Energie gegenüber der NIF). Darüber hinaus sind mit der heutigen Lasertechnologie zwar ein bis maximal einige Pulse pro Tag möglich, ein zukünftiges Kraftwerk würde jedoch 10 – 20 Pulse pro Sekunde benötigen, also etwa eine Million Mal mehr pro Tag als derzeit möglich.

Laut /FIA 25/ gibt es derzeit elf Unternehmen, die an Trägheitsfusionskonzepten zur Energieumwandlung arbeiten, wobei nicht alle Konzepte auf einem lasergetriebenen Trägheitseinschluss basieren. Nachfolgend werden acht dieser Unternehmen und deren jeweiligen Ansätze und Ziele kurz dargestellt. Der Umfang spiegelt dabei die verfügbare Menge an relevanten Informationen wider. Aufgrund der wenig aussagekräftigen Informationslage wurden drei Unternehmen (Anubal Fusion, Laserfusion X und Longview Fusion Energy Systems) nicht eingehender beschrieben./FIA 25/

#### **EX-Fusion**

*Konzept: lasergetriebene Trägheitsfusion*

*Brennstoff: DT*

EX-Fusion wurde 2021 in Japan gegründet. Das Unternehmen konzentriert sich derzeit auf die Entwicklung von Lasersteuerungstechnologien sowie adaptiver Optik für den Hochleistungslaserbetrieb. Ziel ist die Demonstration der Kernkomponenten eines Fusionskraftwerkes auf Systemebene im Jahr 2030, die Inbetriebnahme einer kommerziellen Laserfusionsanlage mit einer Leistung von 200 MW<sub>e</sub> in den 2030er-Jahren und

schließlich bis zum Jahr 2045 eines Laserfusionskraftwerks im Gigawatt-Bereich. Im April 2024 wurde der Betrieb der Experimentieranlage (Integrated Operation Experimental Device, IOD), welche für Tests des integrierten Betriebs der verschiedenen Systeme dient, in Hamamatsu offiziell aufgenommen. Die Anlage umfasst einen 10 Hz Laser, eine 10 Hz-Targetinjektion und eine adaptive Optik. Im Jahr 2024 gelang es EX-Fusion, eine Steuerung der Laserausrichtung in horizontaler Richtung bei einer Frequenz von 10 Hz zu demonstrieren. Dafür wurden frei fallende Testpellets mit einem Durchmesser von 1 mm mit einem Laserstrahl (Durchmesser 1,6 mm) beleuchtet, wobei horizontale Schwankungen über 4 mm kompensiert wurden. Die Trefferquote lag bei 92 % innerhalb einer Abweichung von 0,15 mm; was eine Voraussetzung für erfolgreiche Kernfusionen in der Anlage in Hamamatsu ist.

Mitte 2025 erhielt EX-Fusion 18,1 Millionen US-Dollar (2,6 Milliarden JPY) an Fördermitteln, wodurch sich, laut dem Japan Atomic Industrial Forum, die Gesamtfinanzierung auf 38,98 Millionen US-Dollar (5,6 Milliarden JPY) erhöhte. /FIA 25/, /AEA 24/, /AGA 24/

### **Focused Energy**

*Konzept: lasergetriebene Trägheitsfusion*

*Brennstoff: DT*

Focused Energy ist ein deutsch-amerikanisches Unternehmen, das im Jahr 2021 aus der Technischen Universität Darmstadt hervorging und seinen Sitz in Darmstadt und Austin, Texas, hat. Focused Energy kombiniert die eigene Target-Entwicklung und proprietäre Hochenergie-Festkörperlasertechnologie und strebt eine DT-Trägheitsfusionsreaktion basierend auf der direct-drive Methode an. Der technische Ansatz hierfür umfasst neben der geeigneten Target-Struktur (Pearl™), ein Schnellzündungsverfahren, welches die Verbrennungseffizienz um das 4- bis 5-fache steigern soll, Festkörperlaser, die bei Frequenzen > 10 Hz arbeiten sollen, sowie ein KI-gesteuertes Target-Einschuss- und -Ausrichtungssystem. Die vom Unternehmen entwickelte rund 4 mm große BK Pearl™ nutzt Deuterium und Tritium als Brennstoff, welcher von einer Polymer-Palladium-Hülle umschlossen ist. Bei der Entwicklung der BK wurde auf die automatisierte Massenproduktionstauglichkeit geachtet. Ein Pearl™ soll einen Haushalt einen Tag lang mit Strom versorgen können, d. h. 10 Pearls/s sollen 1 GW<sub>e</sub> entsprechen. /BIE 25/, /FOC 25/

2024 erreichte das Unternehmen erste Meilensteine im Rahmen des US-Fusionsprogramms des Energieministeriums (Department of Energy, DOE). Der

erste war der fertiggestellte Designbericht, der zweite der erfolgreiche Abschluss eines Experiments zur Messung und Optimierung der lasergetriebenen Protonenfokussierung am Laboratory for Advanced Laser for Extreme Photonics der Colorado State University. Außerdem wurde die Fähigkeit zur Herstellung und Ausrichtung von Targets mit hohen Wiederholungsraten im hauseigenen Targetlabor getestet. Im Oktober 2024 gab Focused Energy die Verlegung seines US-Hauptsitzes in die Bay-Area bekannt, wo eine neue Anlage zur Optimierung der Lasertechnologie entstehen soll, die für die Skalierung kommerzieller Fusionsaktivitäten erforderlich ist. Außerdem sollen globale Lieferketten aufgebaut werden. Anfang des Jahres 2025 wurde die Partnerschaft mit dem Laserkonzern Amplitude zur Weiterentwicklung zweier Lasersysteme für die Trägheitsfusion bekannt gegeben. Die neue Technologie soll dazu beitragen, die Laserparameter zu entwickeln und zu bestimmen, die letztendlich für die Kommerzialisierung des Direktantriebs-Ansatzes erforderlich sind. Die Laser der Kilojoule-Klasse dienen der Erprobung der physikalischen Grundlagen für eine effiziente Direktantriebskompression von Deuterium-Tritium-BK. Sie arbeiten mit einer erhöhten Wiederholungsrate von einem Puls alle 60 Sekunden und ermöglichen so eine schnelle Designiteration.

Mit über 175 Millionen US-Dollar an privaten und öffentlichen Fördermitteln ist Focused Energy eines von acht Fusionsunternehmen, die vom US-Energieministerium im Rahmen seines „Milestone-Based Fusion Development Program“ gefördert werden. Das Unternehmen erhielt außerdem erhebliche Zuschüsse vom deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung zur Förderung seiner Forschungs- und Entwicklungsinitiativen. Zudem erhielt Focused Energy im Jahr 2024 Fördermittel in Höhe von 2,5 Millionen Euro, davon 500.000 Euro aus Landesmitteln und 2 Millionen Euro aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung. Ende des Jahres 2025 überreichte der hessische Wirtschaftsminister dem Laserfusionsunternehmen einen Förderbescheid über 20 Millionen Euro. Das Land Hessen unterstützt mit dieser Förderung Maßnahmen, welche die Grundlagen für den zukünftigen Bau und Betrieb eines Fusionskraftwerks legen sollen. /WNN 24/, /SFC 24/, /NEI 25/, /TUD 25/

Am 13. März 2025 unterzeichneten Vertreter aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft eine Absichtserklärung, die den Bau eines laserbasierten Pilotanlagenprojektes am ehemaligen Kernkraftwerksstandort Biblis in Hessen bis 2035 vorsieht. Durch den Einsatz der von Focused Energy entwickelten Brennstoffkapseltechnologie und des Hochleistungslasersystems soll eine Fusionsleistung von 150 – 250 MW erzielt werden. Die Anlage soll Ende der 2030er-Jahre in Betrieb gehen und als Grundlage für die Entwicklung

einer kommerziellen Laserfusionsanlage im industriellen Maßstab in den 2040er-Jahren dienen. Die Absichtserklärung zielt außerdem darauf ab, in Hessen ein hochmodernes Fusionstechnologiezentrum zu errichten, das Forschung, Entwicklung und kommerzielle Anwendungen fördern soll. /WNN 25/

### **Blue Laser Fusion**

*Konzept: lasergetriebene Trägheitsfusion*

*Brennstoff: DT*

Das amerikanische Unternehmen Blue Laser Fusion (BLF) wurde im Jahr 2022 gegründet, hat seinen Sitz in Santa Barbara, Kalifornien, und betreibt weitere Niederlassungen in Japan. BLF arbeitet an der Entwicklung einer neuartigen Hochleistungs-Pulslasertechnologie für die Trägheitsfusion. Das Konzept der Lasertechnologie basiert auf der Implementierung eines großflächigen, hochfeinen Resonators<sup>6</sup>, auch optischer Verstärkungsresonator genannt. Dieser überlagert zeitlich getrennte Pulse kohärent, wodurch kurze Pulse mit Energien im Kilojoule-Bereich, einer Wiederholungsrate von bis zu 10 Hz und einem geschätzten Wirkungsgrad von 40 % (Umwandlung von eingespeistem Infrarotlicht in UV-Licht) erzeugt werden sollen. Während die Technik bereits an kleinen Resonatorlängen (z. B.: 1,5 m langer Prototyp: 1 W eingespeiste Leistung → 58 kW im optischen Verstärkungsresonator (Optical Enhancement Cavity, OEC)) demonstriert wurde, strebt das Unternehmen nun den Bau von Resonatoren mit einer Länge von etwa 150 m an. Die nachfolgende Abb. 3.7 stellt die Roadmap für die geplanten Pilotanlagen dar.

Resonatoren dieser Länge erfordern jedoch hochpräzise Diagnosewerkzeuge und Steuerungen sowie spezielle optische Beschichtungen, um das Laserlicht nahezu verlustfrei zu verstärken. Der Fokus liegt somit auf der Entwicklung fortschrittlicher optischer Interferenzbeschichtungen für den OEC-Laser, um die hohe Pulsenergie und die schnellen Wiederholungsraten erzeugen zu können, die für eine hocheffiziente Fusionsenergieerzeugung erforderlich sind. Das Unternehmen plant den Einsatz eines DT-Brennstoffs. Ein Versuchsreaktor sollte laut /BLF 25/ im Jahr 2025 fertiggestellt werden (was der Phase 1 in der Abbildung entsprechen würde) und die Demonstration eines kommerziell

---

<sup>6</sup> Der Resonator ist eine optische Anordnung, die dazu dient, ein laseraktives Medium anzuregen, das Licht zu verstärken und einen hochenergetischen, fokussierbaren Strahl für Anwendungen (z. B. Fusion) zu erzeugen. Die Resonatorlänge ist dabei ein entscheidender Faktor für die Strahlqualität und die Betriebsstabilität. Hochfeine Resonatoren (Optical Enhancement Cavity), sind Resonatoren mit einem Energieverstärkungsfaktor von über 60.000.

einsatzbereiten Fusionsreaktors ist bis 2030 geplant. Abb. 3.8 zeigt den schematischen Aufbau einer Anlage. /BLF 25/, /ORL 24/, /PAT 25/



Abb. 3.7 Darstellung der Standortplanung für die Pilotanlagen /PAT 25/

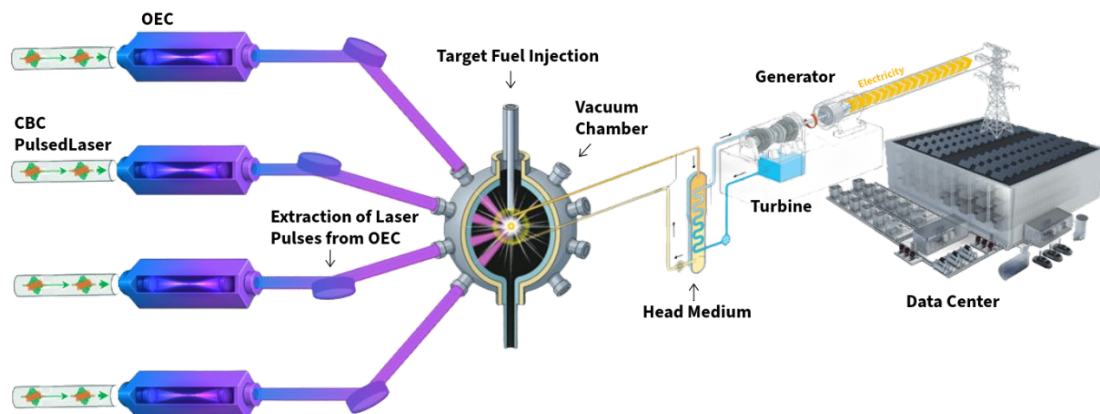


Abb. 3.8 Schematische Darstellung des Anlagenaufbaus /BLF 25/

Das Startup hat eine Finanzierung durch das INFUSE-Programm des DOE erhalten, das private Fusionsunternehmen mit nationalen Laboren vernetzt, um die Entwicklung zu beschleunigen. So soll in Zusammenarbeit mit der Colorado State University (CSU) BLFs OEC-Laser weiterentwickelt werden. Im Rahmen des INFUSE-Projekts sollen Interferenzbeschichtungen hergestellt und evaluiert werden, um geeignete Spiegel für die OEC zu entwickeln. Darüber hinaus sollen Werkzeuge zur Bewertung der Reflektivität und des thermischen Verhaltens der Spiegel entwickelt werden. /FND 25/

## **Marvel Fusion**

*Konzept: lasergetriebene Trägheitsfusion*

*Brennstoff: gemischte Brennstoffe*

Das Unternehmen wurde 2019 in München gegründet. Marvel Fusion arbeitet an der Entwicklung eines neuartigen Mikroreaktorkonzepts, welches Kernfusionsreaktionen durch die Interaktion nanostrukturierter Brennstofftargets mit ultrakurzen (100 fs), ultrahochenergetischen Laserpulsen im ultravioletten (UV-) bis vakuumultravioletten (VUV-) Wellenlängenbereich erzeugen soll. Die in den BK eingebetteten Nanostrukturen sind sehr klein und stellen einen integrierten Nanobeschleuniger dar. Das Unternehmen strebt eine Kostensenkung und Ertragssteigerung durch den Einsatz nanostrukturierter BK und fortschrittlicher Kurzpulslaser sowie der Möglichkeit, aneutronische Fusionsreaktionen (wie Proton-Bor11) zu nutzen, die schnelle Neutronen als Träger der Fusionsenergie vermeiden, an. Ein weiterer Vorteil soll sich aus dem Verzicht der Verwendung und Lagerung von Tritium, wie es im DT-Konzept der thermonuklearen Fusion erforderlich ist, ergeben. /RUH 22/

In den letzten Jahren wurden mehr als 2.000 Experimente durchgeführt, um den Ansatz zu validieren. Im Juli 2025 wurde die neue Laserfusions-Experimentierkammer „LION 2“ am Centre for Advanced Laser Applications (CALA) der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) in Garching bei München offiziell eröffnet. Seit 2022 führen die LMU und Marvel Fusion gemeinsam Experimente an der CALA durch, um die laserbasierte Kernfusion zu erforschen und zu kommerzialisieren. Die neue Experimentierkammer „LION 2“ ermöglicht bisher nicht durchführbare Experimente zur Laser-Materie-Wechselwirkung und zur Hochfeld-Ionenbeschleunigung. Mit diesen erweiterten Möglichkeiten sollen kritische Parameter validiert werden können /MAR 25/. Derzeit baut das Unternehmen eine Testanlage in Fort Collins, Colorado, USA, die in Zusammenarbeit mit der Colorado State University entwickelt wurde. Die Anlage Advanced Technology Lasers for Applications and Science (ATLAS) soll noch im Jahr 2026 fertiggestellt werden, drei hochmoderne Lasersysteme mit mehreren Petawatt Spitzenleistung beherbergen und Fort Collins zu einem globalen Zentrum der lasergetriebenen Fusionsforschung machen. Anschließend will Marvel Fusion mit Siemens Energy als Entwicklungspartner bis 2033 ein Pilotkraftwerk mit einer Leistung von 100 MW bauen. /BUS 25/

Im März 2025 gab Marvel Fusion das Ergebnis einer weiteren Finanzierungsrunde bekannt, insgesamt 113 Millionen Euro. Die Gesamtfinanzierung beläuft sich damit auf 385 Millionen Euro, wovon 170 Millionen Euro aus privaten Investitionen stammen. Des

Weiteren erhielt auch Marvel Fusion einen INFUSE-Zuschuss des US-Energieministeriums (DOE). /WNN 25a/

### **Xcimer Energy**

*Konzept: lasergetriebene Trägheitsfusion*

*Brennstoff: DT*

Das Unternehmen wurde im Jahr 2022 gegründet und hat seinen Sitz in Denver, Colorado, und Niederlassungen in Redwood City, Kalifornien. Xcimer Energy entwickelt eine Laserarchitektur, die laut eigenen Angaben „bis zu zehnmal mehr Laserenergie bei zehnmal höherer Effizienz als das NIF-System kostengünstig erzeugen und gleichzeitig die mit NIF-ähnlichen Architekturen verbundenen Probleme optischer Schäden umgehen wird“. Das Startup setzt nach eigenen Angaben auf Hochenergie-Lasertechnologien, die ursprünglich für die Verteidigungsprogramme der Strategic Defense Initiative der 1980er Jahre entwickelt wurden, die spöttisch als „Star Wars“ bekannt sind.

Der Excimer-Laser kombiniert nichtlineare „Gasoptik“ mit Laserverstärkern, um sehr hohe Strahlenergien zu geringen Kosten zu erzeugen. Excimer-Laser finden bereits kommerzielle Anwendung in der Halbleiterlithographie sowie in medizinischen und industriellen Anwendungen. Wie bei NIF sollen Brennstoffkapseln mit Deuterium-Tritium-Brennstoff (DT) verwendet werden, jedoch sollen die BK wesentlich größer und schwerer sein, was zu höherer Leistung, einfacherer Herstellung und robusterem Betrieb führt. Die höhere Leistung bedeutet, dass ein Kraftwerk mit niedrigeren Wiederholungsraten (< Hz) betrieben werden kann als herkömmliche Konzepte der Trägheitsfusion. Die über mehrere Jahrzehnte hinweg am Livermore National Lab und an der UC Berkeley entwickelte Kammer soll einen in sich geschlossenen Flüssigkeitsstrom aus Lithiumsalz oder FLiBe als Erste Wand verwenden, um die Fusionsleistung zu absorbieren und dahinter liegende Strukturen vollständig zu schützen. /XCI 25/

Im Juni 2025 gab das Unternehmen die Fertigstellung des weltweit ersten privat finanzierten, elektronenstrahlgepumpten Excimer-Lasers bekannt. Das System arbeitet mit der längsten Pulslänge aller Kryptonfluorid-Laser (KrF). Im Mai 2025 erreichte der Laser eine Pulslänge von 3 Mikrosekunden – ein Rekord für diesen Lasertyp. Die Long Pulse Kinetics (LPK)-Plattform von Xcimer ist das erste Schlüsselement des Lasersystem-Prototyps mit dem Codenamen Phoenix, der planmäßig im Jahr 2026 fertiggestellt werden soll. Das LPK sammelt Daten, die die Realisierbarkeit der Xcimer-Technologie belegen sollen. Das Unternehmen reichte drei Monate früher als geplant den Bericht über

sein LPK-System beim Milestone-Based Fusion Development Program des US-Energieministeriums ein. Die Fertigstellung und Inbetriebnahme des LPK stellen für Xcimer den ersten wichtigen technischen Meilenstein in diesem Programm dar. /OPT 25/

Xcimers Ziel für 2030 ist die Fertigstellung des Baus von Vulcan. Diese Anlage soll die weltweit höchste Laserenergie mit den größten jemals gebauten Laserverstärkern erreichen. Die Entwicklung erfolgt auf Basis von Daten von LPK. Der Plan sieht vor, bereits Mitte der 2030er-Jahre die ersten Trägheitsfusionskraftwerke in Betrieb zu nehmen, die Strom ans Netz liefern.

### **First Light Fusion**

*Konzept: schockgetriebene Trägheitsfusion*

*Brennstoff: DT*

First Light Fusion Ltd (FLF) ist ein britisches Forschungsunternehmen im Bereich der Trägheitsfusion mit Sitz in Oxfordshire, England. Das Unternehmen wurde 2011 als Forschungs-Spin-off der Universität Oxford als erstes privates Fusionsunternehmen in Großbritannien gegründet, das Fusionsenergie mittels Trägheitsfusion erforscht. Im April 2022 gab das Unternehmen bekannt, dass es im November 2021 die Fusion mithilfe eines Projektil-Verfahrens (Projectile Fusion) und seiner Verstärkertechnologie demonstriert hatte. Das Ergebnis wurde von der britischen Atomenergiebehörde (United Kingdom Atomic Energy Authority, UKAEA) validiert. First Light Fusion plante einen eigenen Kraftwerkstyp auf Basis dieser Projektil-Technologie, bei der ein Geschoss mithilfe elektromagnetischer Kräfte auf eine Brennstoffkapsel geschossen wird.

Im Januar 2023 gab das Unternehmen eine Vereinbarung mit der UKAEA zur Entwicklung der weltweit größten Pulsstrommaschine, genannt Maschine 4, bekannt. Die Maschine sollte die Fähigkeit der Projektil Fusion zur Erzielung eines Nettoenergiegewinns demonstrieren. Im Februar 2025 wurde bekanntgegeben, dass die Entwicklung von Maschine 4 nicht mehr geplant sei und sich FLF auf kommerzielle Partnerschaften mit anderen Fusionsunternehmen konzentrieren will, die seine Verstärkertechnologie nutzen möchten, sowie auf Nicht-Fusionsanwendungen (z. B. NASA). /WIN 25/, /FIA 25/

Im September 2025 veröffentlichte das Unternehmen ein Whitepaper, in welchem es einen neuartigen, wissenschaftlich fundierten Ansatz zur Fusionsenergie namens FLARE – Fusion via Low-power Assembly and Rapid Excitation – beschreibt. Während beim konventionellen Ansatz der Trägheitsfusion der Brennstoff gleichzeitig komprimiert

und erhitzt wird, um die Zündung zu erreichen, teilt FLARE diesen Prozess in zwei Teile. Zunächst wird der Brennstoff kontrolliert und hocheffizient komprimiert, anschließend wird der komprimierte Brennstoff in einem separaten Prozess gezündet, wodurch ein massiver Energieüberschuss erzeugt wird (Schnellzündung). Laut FLF soll eine experimentelle Anlage ein Zwanzigstel der National Ignition Facility kosten und könnte mit bestehenden, bewährten Technologien gebaut werden. Aufgrund des geringeren Energie- und Leistungsbedarfs der FLARE-Technologie sollen die Kapitalkosten zukünftiger kommerzieller Kraftwerke deutlich niedriger als bei anderen Trägheitsfusions-Systemen sein. /WNN 25a/World Nuclear News, Article: Germany's Marvel Fusion raises further EUR113 million, online: [germanys-marvel-fusion-raises-further-eur113-million](#), March 2025.

/WNN 25b/

## **GenF**

*Konzept: lasergetriebene Trägheitsfusion*

*Brennstoff: DT*

Im Juni 2023 startete die französische Regierung im Rahmen der Initiative „France 2030“ eine Ausschreibung für Projekte zu „innovativen Kernreaktoren“. Thales, ein Anbieter von Hochleistungslasern, reichte in Zusammenarbeit mit dem Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), dem Centre national de la recherche scientifique (CNRS) und der École polytechnique das Projekt TARANIS ein, welches die Machbarkeit der Entwicklung eines ersten Kernfusionsreaktors mit Trägheitseinschluss demonstrieren soll. Das Projekt wurde im Februar 2024 ausgewählt und erhielt für die erste Entwicklungsphase ein Budget von 18,5 Millionen Euro. Um die notwendigen Fachkenntnisse zu bündeln, gründete Thales das Unternehmen GenF, das im Januar 2025 offiziell an den Start ging, und unterzeichnete einen ersten Vertrag im Wert von mehreren Millionen Euro für die Entwicklung seines Fusionslasers.

Bis zum Jahr 2027 plant GenF eine erste Phase der Modellierung und Simulation, deren Ergebnisse durch Experimente an bestehenden Anlagen kalibriert werden sollen. Im Zeitraum 2027 bis 2035 sollen dann die Mehrfachlasersynchronisation ebenso wie die Herstellung kryogener Targets (mit Deuterium und Tritium als Brennstoff) und neue Materialien für die Reaktorwand weiterentwickelt werden. Ab dem Jahr 2035 erhofft sich das Unternehmen die Skalierung des Reaktors mit dem Bau eines ersten Prototyps. Den

Betrieb eines kommerziellen Reaktors mit einer Leistung von 1 GW strebt GenF für die 2050er-Jahre an. /THA 25/

### **Pacific Fusion**

*Konzept: pulsgetriebene Trägheitsfusion*

*Brennstoff: DT*

Pacific Fusion wurde im Jahr 2023 in Kalifornien gegründet. Das Unternehmen arbeitet an einer Trägheitsfusionsanlage, die zur Kompression des Brennstoffs koordinierte, elektromagnetische Impulse nutzen soll. Pacific Fusion arbeitet mit General Atomics (GA) zusammen, um ein Pulsmodul im Produktionsmaßstab zu testen, das elektrische Energie speichert und in leistungsstarken, präzise gesteuerten Pulsen abgibt, um den Brennstoff auf Fusionsbedingungen mit hoher Ausbeute (> 100 MJ) zu bringen. Bei diesem Modul handelt es sich um einen impedanzangepassten Marx-Generator. Pacific Fusion konnte in seinem Fremont Test Center erfolgreich nachweisen, dass die Kernkomponenten jedes Moduls die vorgegebenen Leistungsstandards erfüllen. Dafür wurden über 100 aufeinanderfolgende Tests an einem einzigen Tag absolviert, um die Systemzuverlässigkeit zu bestätigen. Ziel ist es, einen Nettoenergiegewinn der Anlage zu erzielen, bei dem die abgegebene Fusionsenergie die in den Kondensatoren gespeicherte Energie übersteigt. Dieser Meilenstein wurde bisher nicht erreicht und stellt den nächsten großen technologischen Schritt für den Ansatz von Pacific Fusion dar. /GLO 25/

Im September 2025 gab Pacific Fusion bekannt, dass Albuquerque, New Mexico, als Standort für den ersten Forschungs- und Produktionscampus ausgewählt wurde. Dieser wird das Demonstrationssystem beherbergen, welches bis 2030 einen Nettoenergiegewinn (mehr Fusionsenergie als aufgewandte Energie) erzielen soll. /PAF 25/

## **4 Sicherheitsfunktionen und sicherheitsrelevante Systeme**

Wie bereits erwähnt, ist die Umwandlung von Fusionsenergie weltweit ein Gebiet aktiver Entwicklung, Forschung und Innovation. Aufgrund der unterschiedlichen Betriebsarten von Trägheitsfusionsanlagen und Fusionsanlagen, die den magnetischen Einschluss nutzen, unterscheiden sich die wesentlichen Anforderungen für diese beiden Konzepte erheblich, wobei es aber auch Ähnlichkeiten gibt. Grundsätzlich müssen auch laserbasierte Trägheitsfusionsanlagen die Bedingungen für die Fusionsreaktion über mehrere Fusionsereignisse hinweg aufrechterhalten. Derzeit sind zahlreiche Konzepte in der Entwicklung und werden untersucht. Diese sind jeweils mit einer Reihe technischer Herausforderungen verbunden, viele davon spezifisch für das jeweilige Konzept. Dennoch gibt es einige übergreifende Herausforderungen, denen sich die Konzepte in gewissem Maße stellen müssen.

Dazu gehören bei der DT-Fusion der Umgang mit Tritium und der Tritiumkreislauf, Anforderungen an Materialien und deren Beständigkeit nicht nur gegenüber der hochenergetischen Neutronenumgebung sondern auch gegenüber thermischen und mechanischen Lasten, Neutronenphysik und die Validierung nuklearer Daten, Fernwartung und -handhabung sowie integrierte, ganzheitliche Ansätze für die Planung von Fusionsanlagen. Trotz der Fortschritte im Bereich der Trägheitsfusion existiert weltweit weder ein Kraftwerkskonzept noch ein Prototyp eines Leistungsreaktors. Auch Informationen zu beispielsweise Materialforschung für ICF-Anlagen sind nicht so umfangreich wie für Magnetic Confinement Fusion- (MCF-) Anlagen, ganz davon abgesehen, dass die Werkstoffe teilweise erst noch entwickelt und qualifiziert werden müssen. Deshalb werden im Folgenden die Informationen zu Sicherheitsfunktionen und -systemen sowie möglichen Gefahren- und Freisetzungsquellen nur qualitativ diskutiert. In der geringen Informationstiefe spiegelt sich der Umstand wider, dass Informationen bisher nur in geringem Umfang oder gar nicht vorhanden sind.

### **4.1 Sicherheitsfunktionen**

Die technischen Bedingungen für das (zukünftige) Design von laserbasierten ICF-Anlagen werden vor allem durch die thermische, mechanische und Neutronenbelastung der Ersten Wand, der Strukturmaterialien und des Blankets bestimmt sowie durch die Nutzung von Hochenergielasersystemen. Daraus lassen sich wiederum die Maßnahmen ableiten, die umgesetzt werden müssen, um die Sicherheit der Fusionsanlage zu

gewährleisten. Die grundlegenden Sicherheitsfunktionen sind denen von Magnetfusionsanlagen gleich:

- Einschluss radioaktiver und anderer gefährlicher Stoffe,
- Begrenzung der Strahlenexposition durch ionisierende und elektromagnetische Strahlung,
- Begrenzung der Auswirkungen nicht-radiologischer konventioneller Gefahren,
- Begrenzung der Auswirkungen auf die Umwelt.

Der letzte Punkt beinhaltet hierbei nicht nur mögliche Freisetzungen im Betrieb und bei Störfällen, sondern auch die im Betrieb und bei der Stilllegung anfallenden Abfälle.

Die Erfüllung von Sicherheitsfunktionen kann durch unterschiedliche Maßnahmen und Anlagenteile gewährleistet werden. Da es derzeit kein ICF-Anlagendesignkonzept gibt und die technischen und baulichen Lösungen vielfältig sein können, sind die nachfolgenden Darstellungen exemplarisch zu verstehen. Um den Einschluss radioaktiver und anderer gefährlicher Stoffe sowie alle weiteren Sicherheitsfunktionen zu gewährleisten, sind folgende Funktionen notwendig oder könnten notwendig sein:

- Kontrolle der thermischen Energie (Abfuhr von Nachwärme),
- Kontrolle der elektrischen Energie,
- Kontrolle des Lasersystems (Schussfreigabe, Strahlleitsystem...),
- Kontrolle der Reaktionskammer,
- Kontrolle des Kühlmittels,
- Begrenzung der Strahlenexposition des Personals,
- Begrenzung betrieblicher luft- und wassergetragener Freisetzungen in die Umwelt,
- Begrenzung des Abfallaufkommens und schädlicher Abfälle,
- Begrenzung der Strahlenbelastung sicherheitstechnisch wichtiger Komponenten und
- Möglichkeit der Reinigung, Entfernung und des Austauschs von Komponenten.

Die wichtigste grundlegende Sicherheitsfunktion, der Einschluss radioaktiver und gefährlicher Stoffe, muss durch eine Reihe physischer Barrieren sichergestellt werden sowie

durch das Defence-in-Depth Prinzip, um Freisetzungen in die Umwelt oder in Räume, in denen sich Personal aufhält, zu verhindern. Wie bei Magnetfusionsanlagen stellt auch bei Trägheitsfusionsanlagen die Reaktionskammer die erste und wichtigste Barriere dar. Die Reaktionskammer und deren Komponenten und Systeme müssen den zu erwartenden Belastungen standhalten. Dazu zählen vor allem erhebliche thermische und mechanische Lasten, Neutronenströme sowie Target-Trümmer, die zu veränderten Werkstoffeigenschaften führen und die Lebensdauer begrenzen. Aufgrund einiger ähnlicher Belastungen wie bei Magnetfusionsanlagen können unter anderem folgende Anforderungen an die Komponenten der Reaktionskammer unterstellt werden:

- Verwendung von geeigneten Materialien,
- Fähigkeit zur Tritiumrückhaltung,
- Tauglichkeit für einen Betrieb bei Puls-/Einschussfrequenzen von 10 – 20 Hz,
- Möglichkeit des Austausches/der Wartung von Reaktionskammer-Komponenten,
- Übertragung der thermischen Leistung an die Anlage (Wärmeabfuhr).

Dabei müssen die Targets und Laserstrahlen uneingeschränkt zum Zentrum vordringen können. Wenn Deuterium und Tritium als Brennstoff verwendet werden, so wird es zur Diffusion von Tritium aus der Reaktionskammer und den Blankets ins Kühlsystem kommen, wo es zu Anreicherungen kommen kann. Hier müssen Leckagen minimiert werden, um eine Kontamination zu vermeiden.

## **4.2 Sicherheitsrelevante Systeme**

Eine ICF-Fusionsanlage wird eine Reihe einzigartiger Anlagensysteme umfassen, deren Konfiguration und Betriebseigenschaften von der endgültigen Auslegung abhängen werden. Zu diesen Systemen könnten neben der Reaktionskammer mit Erster Wand und Blankets beispielsweise die Tritium-/Hohlrauminjektion, das Isotopentrennsystem (Isotope Separation System), der Tritium-Brutmantel, die Tritium Rückgewinnung und das Recyclingsystem gehören. Die mit der Wartung, Reparatur und dem Betrieb dieser Systeme verbundene Strahlenbelastung hängt von der spezifischen Auslegung, der Leistung und den Betriebseigenschaften der ICF-Anlage ab. Für eine ICF-Prototypanlage liegen diese Informationen derzeit noch nicht vor und es konnte nur auf Informationen von Experimentieranlagen oder Schätzungen zurückgegriffen werden.

#### 4.2.1 Reaktionskammer

Die Technologie für die Reaktionskammer, einschließlich Wärmeabfuhr und Tritiummanagement, birgt schwierige und komplexe Herausforderungen mit vielfältigen, oft konkurrierenden Zielen und Anforderungen. Die Erste Wand dient der Abschirmung und dem Schutz der Strukturmaterialien sowie der Strahlports und der Endoptik vor kurzreichweitigen Emissionen (Röntgenstrahlung, Ionen, Trümmer), jedoch nicht vor den Neutronen. Durch die Auslösung der DT-Reaktion wird die damit verbundene Energie freigesetzt. Das Reaktionsvolumen befindet sich in der Reaktionskammer, deren Erste Wand, wie bei Magnetfusionsanlagen, den Produkten der Fusionsreaktion ausgesetzt ist. Es sind erhebliche Wärmelasten zu erwarten. Derzeit strahlen die Lasersysteme mit einer Gesamtleistung von 0,5 bis 1,5 MJ sehr kurze Pulse von einer bis mehreren Nanosekunden auf das DT-Target. Die Schussfrequenz wird bei mehreren Hertz liegen und die resultierende Fusionsenergie (mehrere zehn MJ) wird innerhalb der ersten paar hundert Nanosekunden auf die Komponenten der Ersten Wand übertragen. Die massiven Partikel-, Wärme- und Strahlungsbelastungen stellen eine erhebliche Herausforderung und Gefahren für die Materialien der Ersten Wand dar. Ohne Gas in der Reaktionskammer werden die Röntgenstrahlen in sehr kurzen Pulsen (wenige Nanosekunden) abgegeben. Ihre Energien reichen von 0,1 bis 100 keV, wodurch sich je nach Wandmaterial eine Eindringtiefe von 10 bis 200  $\mu\text{m}$  ergibt. Die Röntgenstrahlen aus dem direkten Antrieb sind härter, durchdringender und weniger zahlreich als die aus dem indirekten Antrieb, wodurch der momentane Temperaturanstieg an der Wand geringer ausfällt. Aufgrund ihrer geringeren Geschwindigkeit erreichen die Ionen die Wand erst einige Mikrosekunden nach den Röntgenstrahlen. Zudem wird ihre Energie aufgrund der unterschiedlichen Energien und Ionenarten innerhalb weniger Mikrosekunden an die Wand abgegeben. Das Ionenspektrum hängt vom Targettyp ab, enthält aber bei indirektem Antrieb stets Wasserstoffisotope, Helium und Kohlenstoff. Im Allgemeinen deponieren die Ionen ihre Energie und implantieren sich innerhalb weniger Mikrometer unter der Oberfläche, was zu einem Temperaturanstieg und potenziell zu Materialerosion an der Wand führen kann. Weitere Schädigungsmechanismen können Blasenbildung, oberflächennahe Ionen- und thermische Schäden, Staubbildung und Materialablagerung, zyklische thermomechanische Spannungen sowie volumetrische Schäden durch Fusionsneutronen und Gammastrahlung sein. Einige dieser Probleme ähneln denen von MCF-Konzepten, wobei der hochfrequente Pulsbetrieb der ICF besondere Herausforderungen mit sich bringt. Von besonderer Bedeutung für ICF-Laserkonzepte ist die Beschädigung der Endoptik des Lasersystems. /NAA 13/

Die zentrale Herausforderung besteht darin, eine Konfiguration zu entwickeln, die den typischerweise 300 Millionen Hochenergiepulsen pro Jahr aus Röntgenstrahlung, Ionen und Neutronen, die von der Fusionsreaktion ausgehen, langfristig standhält. Dieses Gefahrenspektrum hängt vom Targetdesign ab. Bei nahezu allen ICF-Targets werden etwa 70 % der Fusionsenergie als Neutronen freigesetzt. Bei einem direkt angetriebenen Target werden typischerweise 28 % der Strahlung als Ionen und 2 % als Röntgenstrahlung emittiert. Bei einem indirekt angetriebenen Target ist dieses Verhältnis annähernd umgekehrt, 25 % werden als Röntgenstrahlung und 5 % als Ionen emittiert.

Für die ehemals geplante HiPER-Anlage wurden Belastungen der Materialien für die Erste Wand, durch die aus Fusionsreaktionen stammenden He-Ionen, von etwa 200 GW/m<sup>2</sup> erwartet. Des Weiteren wurde mit Belastungen in der Größenordnung von 40 GW/m<sup>2</sup> durch Trümmerpartikel aus dem Rest der DT-BK gerechnet, die die Erste Wand für etwa 2 ms mit einer Wiederholungsrate von 1 – 10 Hz beaufschlagen. Der gepulste Betrieb einer ICF-Anlage bringt eine zusätzliche Herausforderung mit sich. Die nahezu instantane Freisetzung einer großen Energiemenge birgt das Risiko des Schmelzens, der Sublimation und des Abplatzens von plazmazugewandten Materialien. Des Weiteren bedeuten höhere Wiederholungsfrequenzen auch weniger Zeit zum Reinigen der Kammer für den nächsten Puls und es könnten größere Pumpanschlüsse erforderlich sein. Höhere Pulsfrequenzen reduzieren auch die Zeit, die für die Kühlung des Kammergases zwischen den Pulsen zur Verfügung steht. Somit wird der zyklische Betrieb mit hoher Pulsfolge für einen geplanten Betriebszeitraum von 20 – 30 Jahren die Wahrscheinlichkeit von Materialversagen, z. B. durch thermische Ermüdung, deutlich erhöhen. Darüber hinaus wird die intensive Teilchenstrahlung zur Aktivierung von Komponenten führen. Hinzu kommt die Tritiumpermeation durch das Material der Ersten Wand und der Blankets. /NAA 13/, /LIT 21/

Es gibt zwei Hauptarten von Reaktionskammern, solche mit festen und solche mit flüssigen Wänden. Die Wahl einer massiven Wand wird üblicherweise durch die von Anfang an geforderte Robustheit des Designs begründet. Die Konzepte für flüssige Wände basieren üblicherweise auf Lithium und stellen entweder reine Lithium-Wandlösungen oder die Lithium-Blei-Kombination dar – was vorteilhaft ist in Bezug auf die Erbrütung von Tritium. Wiederholte Kurzpuls-Leistungsbelastungen können zu Effekten wie Flüssigkeitsspritzern und -verdampfung und schließlich zur Ablation führen. Eine Möglichkeit zur Reduzierung von Schäden der Ersten Wand ist die magnetische Ablenkung der Fusionsionen. Bei moderaten, homogenen Magnetfeldern ( $\approx 1$  T) lässt sich die

eindimensionale Plasmaausdehnung auf  $\approx 4$  m begrenzen, wodurch die Ionenflüsse an der Wand stark reduziert werden könnten. Dreidimensionale Effekte und die Erzeugung von Neutralteilchen dürften jedoch die Wirksamkeit dieses Ansatzes verringern. Je nach Design könnte ein Füllgas mit geringer Dichte in der Reaktionskammer verwendet werden, um kurzreichweitige Strahlung zu absorbieren und die Wärmelast auf die Erste Wand zu verteilen, um so Schäden zu reduzieren oder zu vermeiden. /LIT 21/, /PIE 97/

Die Reaktionskammer, die Erste Wand und das Blanket sind entscheidende Komponenten eines Trägheitsfusionskraftwerks. Sie ermöglichen die Umwandlung der bei Fusionsreaktionen freigesetzten Energie sowie die Erzeugung des Tritiumbrennstoffs. Deren Werkstoffauswahl und Design sind dabei mit der Wahl und dem Design der Laser- und Targettechnologien verknüpft. /NAA 13/

#### **4.2.2 Strukturmaterialien und Blanket**

Eine weitere wichtige Komponente ist das Blanket, in welchem nicht nur der Brennstoff Tritium erbrütet werden soll, sondern das auch zur Energiegewinnung, für den Brennstoffkreislauf und die Abschirmung der Reaktionskammer gegenüber der Umgebung genutzt wird. Der aktuelle TRL eines Brutblankets für ICF-Anlagen ist jedoch aufgrund von Einschränkungen und Auflagen beispielsweise hinsichtlich des Blanket-Materials, die sich aus den besonderen Bedingungen und Zielen des Fusionskraftwerks ergeben, noch rudimentär bzw. es existiert kein (praktikables) Brutblanket-Design, das einen dauerhaften ICF-Betrieb ermöglicht. Das Blanket muss aus geeigneten Materialien gefertigt sein, die unter Bestrahlung mit schnellen Neutronen keine langlebigen Isotope bilden (beispielsweise darf Nickel nicht verwendet werden, da sich das radioaktive, langlebige Co-60 bildet), ebenso muss die Nachzerfallswärme berücksichtigt werden. Infolgedessen befinden sich auch die Randbedingungen des Brennstoffkreislaufs auf einem niedrigen TRL-Niveau. Zur Umwandlung von Energie in einem Fusionskraftwerk ist darüber hinaus die Trennung und Wiederaufbereitung der Wasserstoffisotope (Tritium, Deuterium) aus dem Abgas oder dem Blanket notwendig. /LIT 21/

Die Strukturmaterialien in ICF-Anlagen sind naturgemäß geringeren Leistungs- und Strahlungsbelastungen ausgesetzt als die Erste Wand. Gleichzeitig ist jedoch ihre Langzeitbeständigkeit unter zyklischer mechanischer Belastung und schließlich auch unter signifikanten Temperaturschwankungen erforderlich, da die Strukturmaterialien die Panzerung der Ersten Wand tragen. Die Auswirkungen der Nachzerfallswärme in möglichen

Unfallszenarien, die die Integrität der Reaktionskammer gefährden könnten, muss untersucht und mit in die Entwicklung des Designs einbezogen werden.

### **4.2.3 Optik**

Des Weiteren benötigen die laserbasierten ICF-Anlagen eine umfangreiche Optik, um die Laserstrahlung auf die DT-BK zu lenken. Die optischen Komponenten umfassen sowohl die fokussierende Optik als auch die zugehörigen Wellenleiter und Trägersysteme. Bei der Optik bestimmen die Strahlungsintensität und die thermomechanischen Belastungen die Bedingungen und maßgeblich die Auslegung der Komponenten. Die Optik könnte zwischen der Reaktionskammer und einem äußeren Schild positioniert werden und es wird davon ausgegangen, dass Anteile durch den Betrieb Schädigungen erfahren werden, da sich die Optik je nach Verfahren (z. B. direkter Antrieb) in direkter Sichtlinie zu den Targetemissionen befinden und daher möglichen Schäden durch Targetreste sowie Neutronen-, Röntgen- und Teilchenstrahlung ausgesetzt sein wird. Möglicherweise könnte die magnetische Ablenkung von Ionen zum Schutz der Eintrittsöffnungen und der Endoptik genutzt werden. In gasgefüllten Kammern könnte das Puffergas die Endoptik vor kurzreichweitigen Targetemissionen schützen. In jedem Fall müssen Endoptiken gewählt werden, die möglichst unempfindlich gegenüber Oberflächenstörungen und Ausrichtungsfehlern sind. Außerdem sollte ein regelmäßiger Austausch möglich sein. Für die optischen Tuben werden verschiedene Materialien in Betracht gezogen, darunter sowohl niedrigaktivierbarer als auch herkömmlicher Edelstahl SS304L. Der Schutz der Optik kann mit einem zweigleisigen Ansatz erreicht werden: Gasstöße über einen Bremsweg in der Größenordnung von einigen Pa·m reichen aus, um die schwereren, geladenen Teilchen zu stoppen, während kleine Magnete mit Feldern  $< 0,5$  T leichtere Teilchen wie die Heliumionen ablenken können.

### **4.2.4 Brennstoffsysteme**

Zum Brennstoffkreislauf zählen neben der Erbrütung von Tritium, unter anderem auch die Tritiumrückgewinnung und das Recyclingsystem sowie die Brennstoffinjektion. Alle diese Systeme stehen am Anfang der Entwicklung und im besten Fall sind Ideen für diese Systeme vorhanden. Die Herausforderungen bei der Tritiumproduktion, -rückgewinnung und -verwaltung sind typischerweise technischer und materialwissenschaftlicher Natur. Hinzu kommen Verständnis-Unsicherheiten beispielsweise die Tritiumpermeation (und Methoden zu deren Reduzierung) betreffend sowie bezüglich der Tritiumaufnahme in Strukturmaterialien und der Tritiumentfernung aus dem Brutmantel.

Des Weiteren muss ein Brennstoffinjektionssystem so entwickelt werden, dass es Hohlraumkapseln (indirekter Antrieb) oder Brennstoffkapseln (direkter Antrieb) sicher injizieren kann, bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung des Betriebs. Ein Brennstoffinjektionssystem, das einen dauerhaften Plasmabetrieb ermöglicht, existiert bisher noch nicht. /NAA 13/

#### **4.2.5 Instrumentierungs- und Steuerungssysteme**

Die Instrumentierungs- und Steuerungssysteme (I&C-Systeme) umfassen Strahlungsüberwachungssysteme und Detektoren zur Überwachung der Fusionsreaktion sowie Geräte zur Messung der Ausgangsleistung, der Plasmaparameter, der Verunreinigungen und der Fusionsreaktionsprodukte. Zusätzliche Instrumente müssen entwickelt werden, um Kühlwasserströme, Druck und Temperatur in der Fusionskammer, Durchflussparameter des Primär- und Sekundärsystems sowie Leckageraten zu überwachen. /BEV 25/

#### **4.3 Mögliche Gefahren- und Freisetzungsquellen**

Verschiedene Energiequellen einer ICF-Anlage können im Falle eines Unfalls oder Störfalls radioaktive und toxische Stoffe mobilisieren und freisetzen und so Gefahrenquellen darstellen. Zu den möglichen radiologischen Gefahren der Fusionsenergieerzeugung zählen:

- Tritium,
- mit Tritium versetzte Materialien (Tritiumdiffusion),
- entstehende Gammastrahlung,
- aktivierte Komponenten, Materialien und Stäube,
- Beimengungen radioaktiver Isotope in Reaktorkomponenten, Entstehung radioaktiver Isotope durch Neutroneneinfänge durch Verunreinigungen im Ausgangsmaterial.

Daneben können auch nichtionisierende Strahlungsquellen wie Hochenergielaser und Mikrowellen als Gefahrenquellen genannt werden. Zu den industriellen Gefahren könnten chemisch gefährliche Stoffe (z. B. Blei), chemisch reaktive Stoffe (z. B. Lithium oder flüssige Metalle), physikalisch gefährliche Stoffe (z. B. flüssiges Helium), Systeme mit extrem hoher oder niedriger Temperatur, hohe Druck- oder Vakuumbedingungen und

die großen Stromerzeugungskomponenten wie Turbogeneratoren und elektrische Transformatoren, gehören.

Einige dieser Energiequellen, mögliche Folgen ihrer Freisetzung und Kontrollmaßnahmen sind in Tab. 4.1 zusammengefasst. Es sei darauf hingewiesen, dass die in Tab. 4.1 enthaltenen Extrapolationen der Leistungs- und Energieauslegungsbedingungen von ITER auf ICF-Anlagen spekulativ und als eine erste grobe Schätzung zu betrachten sind (aus /BEV 25/ entnommen). Alle diese Energiequellen bergen das Potenzial, radioaktives Material freizusetzen und zu erhöhten Strahlendosen innerhalb und außerhalb des Anlagengeländes zu führen.

**Tab. 4.1** Geschätzte ICF-Gefahren- und Freisetzungsquellen /BEV 25/

Quelle	Leistung/ Energie	Mögliche Folgen	Designkontroll- maßnahmen
Fusionsenergie	≈ GW	Schmelzen von Reaktionskammerkomponenten, Kühlmittelverlustunfälle in der Reaktionskammer, Mobilisierung und Freisetzung von Materialien aus der Reaktionskammer, Aktivierungsprodukten und Tritium	Auslegung von Kühl- und Steuerungssystemen, Auslegung von Abschaltssystemen, passive Abschaltssysteme für hohe Lastspitzen
Zerfallswärme von Aktivierungsprodukten	≈ 0,1 - 1 GJ	Erwärmung von Reaktionskammerkomponenten und -materialien Abfallmanagementprobleme aufgrund des Austauschs aktivierter Komponenten, Zerfallswärme treibt die Mobilisierung radioaktiver Materialien an	Prozesskontrolle der Zerfallswärmeproduktion, Defense-in-Depth, Auslegung des Kühlsystems, aktive Zerfallswärmeabfuhrsysteme, passive Wärmeabfuhr durch Strahlungswärmeübertragung und natürliche Zirkulationskühlung

Quelle	Leistung/ Energie	Mögliche Folgen	Designkontroll- maßnahmen
Chemische Reaktion (nach einer Fusionsreaktion)	≈ GJ	Überhitzung von Reaktionskammerkomponenten, Wasserstoffbrände oder -explosionen, Überdruck oder Beschädigung der ICF-Reaktionskammer, Triebkraft zur Mobilisierung radioaktiver Materialien	Begrenzung des Temperaturanstiegs an den Reaktionskammerwänden, Konstruktionsmaßnahmen zur Minimierung der Ansammlung von Fusionsmaterialien
Kühlmittelverlust	≈ 100 GJ	Druckbeaufschlagung der ICF-Reaktionskammer und des Wärmetransportsystems, Druckbeaufschlagung erzeugt eine Triebkraft für die Mobilisierung radioaktiven Materials	Druckentlastungssysteme

Im Allgemeinen entstehen radiologische Gefahren durch Neutronenstrahlung und Tritium, das nicht in Fusionsreaktionen verbraucht wurde. Routinemäßige Betriebs- und Wartungsarbeiten beinhalten den Umgang mit radioaktiven Materialien. Das Personal kann durch technische Sicherheitsvorkehrungen, strikte Einhaltung der Verfahrensvorschriften und die Durchführung von Arbeiten unter radiologischen Arbeitsgenehmigungen vor diesen Gefahren geschützt werden.

Wie in /BEV 25/ beschrieben, treten zwei große Energiequellen bei Trägheitsfusionsanlagen auf. Zum einen die mit jedem Puls erzeugte Fusionsenergie und zum anderen die von den Aktivierungsprodukten ausgehende Zerfallswärme. Die Fusionsenergie pro Puls ergibt sich aus der Treiberenergie, wobei die Treiber Laser, leichte Ionen oder schwere Ionen sein können, multipliziert mit der Repetitionsrate und dem Energiegewinn des Targets. Je nach Repetitionsrate ergibt das eine Anzahl von Fusionsreaktionen mit einer Energie von mehreren hundert MJ pro Sekunde, welchen die Reaktionskammer über mehrere Milliarden Pulse und Jahre hinweg standhalten muss. Alle infrage kommenden Treiber benötigen ein Vakuum (< 1 kPa), damit sich die Treiberenergie zum Target ausbreiten kann.

#### 4.3.1 Neutronen

Das radioaktive Inventar sowie mögliche Gefahrenquellen stehen auch im Zusammenhang mit dem verwendeten Brennstoff. Werden Deuterium und Tritium als Brennstoff für die Fusionsreaktion eingesetzt, so ist aufgrund der entstehenden Neutronen sowohl die Aktivierung von Strukturmaterialien (Stähle, Wolfram, Beton etc.) als auch des Kühlmediums zu erwarten. Die  $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$  Reaktion wird durch die 14,1 MeV Fusionsneutronen begünstigt. Bei der aneutronischen Fusion, beispielsweise Wasserstoff (Proton)-Bor-11-Fusionsreaktion (p-B11), wird die in der Fusionsreaktion erzeugte Energie nicht durch Neutronen, sondern durch geladene Teilchen (Alphateilchen) transportiert. Da bei dieser Reaktion keine Neutronen direkt entstehen, findet nur eine geringe Aktivierung von Materialien statt. Die Reaktion erfordert jedoch etwa die zehnfache Temperatur einer Deuterium-Tritium-Reaktion. Die Gefahren der aneutronischen Konzepte beziehen sich hauptsächlich auf die Methoden zur Plasmaerzeugung.

Die Aktivierung durch die Fusionsneutronen ist ein Problem sowohl in Bezug auf die radiologische Belastung des Personals bei Reparatur-, Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten als auch bei der Stilllegung. /UKA 21/, /LIT 21/, /BEV 25/

#### 4.3.2 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 dynamische Einschlusssysteme erforderlich. Unterdruckbereiche, angepasste Luftwechselraten und aktive Detritiationssysteme minimieren die Permeation von Tritium durch Barrieren, die Strahlenbelastung für das Personal und die Freisetzung in die Umwelt. Obwohl Tritium eine geringe Radiotoxizität aufweist, erfordern die physikalischen Eigenschaften und das in Fusionsanlagen enthaltene Inventar umfassende Sicherheitsmaßnahmen sowohl für Normalbetrieb als auch für Störfall und Notfall.

Grundsätzlich wird der Tritiumgehalt in einer Trägheitsfusionsanlage als geringer eingeschätzt als in einer Magnetfusionsanlage, allerdings ist die Genauigkeit der Schätzungen durch den geringen Umfang von Forschungsdaten und Designstudien begrenzt. Tritium wird tritiierte Strukturmaterialien (Stähle, Wolfram, Beton etc.) und eventuell Wasser, sollte dies als Kühlmittel Verwendung finden, mit sich bringen. Eine Tritiumaufnahme und Kontamination des Personals kann beispielsweise durch ferngesteuerte

Brennstoffinjektions- oder Wartungssysteme minimiert werden. Das Tritium, welches nicht bei der Fusionsreaktion „verbrannt“ wird, wird aus der Reaktionskammer abgeführt, gereinigt und für die Produktion von neuen Targets zur Verfügung gestellt. Daneben wird es einen Brutkreislauf für Tritium geben. Das Tritiuminventar innerhalb der Anlage ist einerseits abhängig von der Verbrennungsrate, je höher diese ist, desto geringer die Verarbeitungsrate und der Tritiumbestand. Andererseits wirken sich die Produktion neuer Targets, Targettyp und Fülltechnologie auf den Tritiumbestand ebenso aus wie die Material- und Konstruktionsauswahl des Brutkreislaufes. Wahrscheinlich liegen das Tritiuminventar im ICF-Brennstoffkreislauf (Abgasreinigung, Isotopentrennsystem, Targetfabrik) je nach Targettyp und Befüllungsmethode zwischen einigen Hundert Gramm und mehreren Kilogramm. /PIE 97/, /BEV 25/

#### **4.3.3 Staub**

Die Entstehung von insbesondere aktivierten Stäuben, ihre Zusammensetzung, die Entstehungspfade sowie das Verhalten bei Filterung und einer möglichen Freisetzung in die Umwelt sind zu berücksichtigen. Aktivierter Staub kann sowohl während des Betriebs durch Schichtabscheidung und -zerfall als auch bei Störungen und Wartungsarbeiten entstehen. Quantitative Abschätzungen der Staubmengen in Tokamaks sind mit großen Unsicherheiten behaftet, für Trägheitsfusionsanlagen liegen keine Abschätzungen vor.

#### **4.3.4 Magnet- & Lasersysteme (Hochstromtechnologien)**

Die Sicherheitsbedenken bei Hochenergielasern betreffen die potenzielle Beschädigung optischer Komponenten durch die intensiven Pulse. Daher ist es wichtig, die laserinduzierte Schadensschwelle (Laser-Induced Damage Threshold, LIDT) zu kennen. Die physikalischen Mechanismen, die zu laserinduzierten Schäden führen, können sehr komplex sein und hängen von der Pulsdauer und der Laserwellenlänge ab. Daher werden LIDT-Werte typischerweise experimentell bestimmt, indem das Ausmaß der bei verschiedenen Intensitätsstufen induzierten Schäden ermittelt wird. Der LIDT-Wert eines Materials oder Bauteils wird für eine bestimmte Wellenlänge oder einen Wellenlängenbereich definiert. Außerdem sind Sicherheitsverriegelungen vorzusehen. Diese aktiven Systeme verhindern die Zündung des Lasers unter unsicheren Bedingungen, indem sie sicherstellen, dass die Sicherheitsverriegelungsschalter geschlossen sind und weitere Signale anliegen.

Des Weiteren gehen Gefahren von der Stromquelle der Laser aus. Sie enthalten oft Hochspannungen und Energiespeicherkondensatoren und können auch wassergekühlt sein. Hochdruck-Bogenlampen, Glühlampen und Kondensatorbatterien in Laseranlagen können Explosionsgefahren bergen. /MKS 25/

#### **4.4 Mögliche Störfallszenarien**

Neben Freisetzungen im Normalbetrieb und bei anormalen Ereignissen sollten für Trägheitsfusionsanlagen auch Störfälle und auslegungsüberschreitende Ereignisse mit potenziellen Freisetzungen analysiert werden. Ein Spektrum relevanter Auslösender Ereignisse könnte in Analogie zu den für ITER und DEMO betrachteten Ereignissen abgeleitet werden. Hierzu würden dann beispielsweise Kühlmittelverlustunfälle (LOCA), Strömungsverlustunfälle (LOFA) und Vakuumverlustunfälle (LOVA) zählen.

##### **LOCA – Loss of Coolant Accidents**

Aus strahlenschutztechnischer Sicht würde ein LOCA in einer ICF-Anlage die Kühlung sicherheitsrelevanter Systeme einschränken, wodurch radioaktives Material (z. B. Aktivierungsprodukte und Tritium) in die Anlagenbereiche und potenziell in die Umwelt freigesetzt werden könnte. Er könnte Komponenten der Reaktionskammer und die Integrität der Kammer selbst beeinträchtigen, Temperatur und Druck in der Reaktionskammer würden sich erhöhen und somit die strukturelle Integrität gefährden. Durch Leitungsbrüche könnte Kühlmittel in die Reaktionskammer gelangen, was zu einer Überdrucksituation sowie zu chemischen Reaktionen mit den Kammerkomponenten und -materialien führen kann. Während des Plasmabetriebs würde das in die Reaktionskammer eindringende Kühlmittel die Fusionsreaktion stören und beenden. Eine thermisch oder chemisch induzierte Reaktion würde die Freisetzung radioaktiven Materials begünstigen. Tritium und Aktivierungsprodukte dürften den größten Anteil der Quellterme eines Kühlmittelverluststörfalls ausmachen. Die Schwere eines LOCA hängt von den Konstruktionsmerkmalen des Fusionsreaktors und der Abfolge der Ereignisse ab, die zum Störfall führen. LOCAs können auch Schäden an Rohrleitungen in Systemen außerhalb der Reaktionskammer umfassen. Diese betreffen Rohrleitungen, die mit Wärmeabfuhrsystemen verbunden sind, oder Dampferzeugerrohrleitungen. Die Auswirkungen sind voraussichtlich weniger schwerwiegend als Ereignisse mit Schäden an Kühlsystemen, bei denen Kühlmittel in die Fusionsreaktionskammer eindringt. /BEV 25/

## **LOFA – Loss of Flow Accidents**

Strömungsverlustunfälle resultieren aus transienten Zuständen, die die Kühlwasserzufuhr zur Reaktionskammer unterbrechen. Auslöser solcher Zustände können mechanische Ausfälle von Ventilen, Pumpen und Instrumenten, menschliche Fehler (falsche Ventilpositionierung) sowie externe Stromausfälle sein. Die Dauer des Störfalls bestimmt den Schweregrad. Bei nicht rechtzeitiger Wiederherstellung kann sich ein LOFA in einen LOCA ausweiten. Dies geschieht, wenn ein Strömungsverlust zu Überhitzung und anschließender Beschädigung der Kühlmittelleitungen führt. /BEV 25/

## **LOVA – Loss of Vacuum Accidents**

In einer ICF-Anlage ist die Plasmakammer für den Betrieb unter Vakuumbedingungen ausgelegt. Ein Vakuumverlust tritt ein, wenn der Druck in der Reaktionskammer ansteigt. Druckanstiege können durch eindringendes Gas oder Luft, durch fehlgeleitete Laserstrahlen, die Wandmaterial verdampfen, durch unzureichend abgeführten, nicht verbrannten Brennstoff<sup>7</sup>, durch Komponentenausfälle oder durch Druckbeaufschlagung der Reaktionskammer nach einem Kühlmittelverluststörfall (LOCA) verursacht werden. Die Schwere eines Vakuumverlusts hängt vom Betriebszyklus der ICF-Anlage ab und ist während des Plasmabetriebs am größten. Im Allgemeinen ist ein Vakuumverlust jedoch weniger gravierend als ein LOCA. /BEV 25/

Die angenommenen Auslegungsstörfälle der ICF weisen ausreichend Energie auf, um die Wahrscheinlichkeit einer Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Anlagenbereiche und die Umwelt zu erhöhen. Das Ausmaß der Freisetzung hängt vom verfügbaren radioaktiven Material und den spezifischen Störfallbedingungen ab. Eine genauere Charakterisierung dieser Ereignisse erfordert detaillierte Informationen zur Auslegung und den Betriebseigenschaften der ICF-Anlage (Kühlmittel, Brutdesign, Strukturmaterialien, Betriebsweise etc.).

---

<sup>7</sup> Effizientes Abpumpen (Exhaust Pumping) ist entscheidend, um den Druck in der Reaktionskammer niedrig zu halten. Eine Ansammlung von unverbranntem Brennstoff erhöht den Druck und kann zum Verlust des Vakuums und zur Abkühlung des Plasmas führen.

#### **4.5 Zwischenfazit**

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Sicherheitsfunktionen und sicherheitsrelevante Systeme von Trägheitsfusionsanlagen derzeit nur auf konzeptioneller Ebene beschrieben werden können. Zwar lassen sich grundlegende Sicherheitsziele wie beispielsweise der Einschluss radioaktiver Stoffe identifizieren, die konkrete technische Umsetzung ist jedoch stark vom jeweiligen Anlagenkonzept abhängig und bislang nicht ausreichend spezifiziert. Eine belastbare sicherheitstechnische Bewertung von Trägheitsfusionsanlagen ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht möglich. Die identifizierten Sicherheitsfunktionen und -systeme stellen vielmehr eine erste strukturierende Grundlage dar, auf der zukünftige detaillierte Analysen aufbauen können. Erst mit der Entwicklung konkreter Anlagenentwürfe, validierter Werkstoffdaten, realistischer Betriebsparameter und systematischer Störfallanalysen wird es möglich sein, Sicherheitsanforderungen quantitativ zu spezifizieren und das tatsächliche Gefährdungspotenzial solcher Anlagen verlässlich zu bewerten.



## **5 Internationaler Entwicklungsstand bezüglich der Regulierung von Fusionsanlagen**

Neben der Beantwortung technischer Fragen ist es unerlässlich, einen regulatorischen Rahmen für Fusionsanlagen zu schaffen, nicht zuletzt, um Planungssicherheit für Entwickler und zukünftige Betreiber von Fusionskraftwerken zu gewährleisten. Dabei müssen beide Entwicklungen Hand in Hand gehen. Nachfolgend wird der aktuelle Entwicklungsstand bzgl. der Regulierung von Fusionsanlagen sowohl für Deutschland als auch für weitere Länder exemplarisch dargestellt. Die Länder wurden dabei in Bezug auf ihre bestehende Fusionsinfrastruktur sowie auf bestehende Fusionsregulierungsprojekte ausgewählt. Des Weiteren werden die relevantesten Informationen des im Februar 2026 veröffentlichten IAEA TECDOC-2115 „International Experience in the Regulation of Fusion Facilities“ zusammengefasst.

### **5.1 Deutschland**

Wie im Koalitionsvertrag von April 2025 formuliert und Anfang Oktober 2025 im Aktionsplan „Deutschland auf dem Weg zur Kernfusion“ bekräftigt, soll die Kernfusion im Rahmen des Strahlenschutzgesetzes (StrlSchG) und damit außerhalb des Atomrechts reguliert werden. Die Bundesregierung kündigte eine „explizite Regelung der Kernfusion im Strahlenschutzgesetz“ bis Ende 2026 an. Die Zuordnung zum StrlSchG gründet sich auf der Tatsache, dass die Kernfusion keine Kernbrennstoffe (spaltbaren Stoffe) einsetzt, mit denen eine sich selbst tragende Kettenreaktion aufrechterhalten werden kann und damit inhaltlich nicht unter das Atomgesetz (AtG) fällt. Das StrlSchG erwähnt die Kernfusion zwar nicht ausdrücklich, allerdings erfüllen Kernfusionsanlagen die Definition von Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung (§ 5 Abs. 2 StrlSchG). Bis Ende des Jahres 2026 soll die Kernfusion explizit im StrlSchG erwähnt werden. Mit den Vorschriften rund um diese Anlagen, insbesondere den Genehmigungsvorschriften für die Errichtung (§ 10 StrlSchG) und für den Betrieb (§ 12 Abs. 1 Nr. 1 StrlSchG) sowie sonstigen Bestimmungen zum Strahlenschutz, stellt das StrlSchG ein Regelungssystem dar, das die strahlenschutzrelevanten Aspekte erfasst. Daneben kommen einzelne Normen des AtG, auf die das StrlSchG verweist, z. B. § 12b AtG zur Zuverlässigkeitsüberprüfung und § 9a AtG zu Pflichten mit Bezug auf radioaktive Reststoffe und Abfälle, zur Anwendung. Erhebliche Unterschiede bei den unterschiedlichen Technologien für Fusionsanlagen könnten durch Detailanforderungen im Regelwerk berücksichtigt werden. /RAE 25/

Im vom damaligen Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ab Anfang 2025 im Rahmen des Förderprogramms „Fusion 2040 – Forschung auf dem Weg zu Fusionskraftwerken“ geförderten Pilotprojekt „ReFus“ erarbeiten die Projektpartner (z. B. MPIL, GRS, Öko-Institut, KIT) und assoziierten Partner (z. B. Marvel Fusion, Proxima Fusion, Commonwealth Fusion Systems etc.) eine konzeptionelle Grundlage für einen rechtlichen und technischen Rahmen für Fusionskraftwerke. Dabei wird untersucht, inwieweit bestehende Strahlenschutzbestimmungen für die Kernfusion im Hinblick auf zukünftige Kraftwerke angepasst oder gegebenenfalls erweitert werden sollten. Mit Stand des 4ten Verbundtreffens im Januar 2026 wurden bisher ein Überblick über die rechtliche Situation erstellt, die Regulierungssituation von bestehenden und geplanten Anlagen (Wendelstein 7-X, ITER) ausgewertet, eine exemplarische Anwendung des bestehenden Rechts auf eine fiktive Fusionsanlage durchgeführt sowie ein Konzept zum Gefährdungspotenzial und ein erster Konzeptentwurf zur Regulierung von Fusionsanlagen erarbeitet. Das Projekt läuft noch bis Mitte 2026.

## **5.2 USA**

Die USA haben als erstes Land konkrete legislative Schritte zur Fusionsregulierung unternommen und entschieden, die Fusionsregulierung von der Regulierung der Kernkraftwerke zu trennen. Das Atomic Energy Act reguliert sowohl Kernkraftwerke als auch Aspekte des allgemeinen Strahlenschutzrechts. Das Gesetz unterscheidet dabei zwischen „special nuclear material“ und „byproduct material“. „Special nuclear material“ ist im Wesentlichen definiert als Plutonium und angereichertes Uran. Unter „byproduct material“ wurde bis 2024 Material verstanden, welches als Nebenprodukt des Spaltungskreislaufs oder von Teilchenbeschleunigern anfällt. Mit dem im Juli 2024 in Kraft getretenen Gesetz zur Beschleunigung des Einsatzes vielseitiger, fortschrittlicher Kernenergie für saubere Energie („Accelerating Deployment of Versatile, Advanced Nuclear for Clean Energy Act of 2024“, ADVANCE Act) wurde die Definition dahingehend erweitert, dass nun auch „byproduct material“ aus Fusionsanlagen (fusion machines) eingeschlossen ist. Weiterhin verpflichtet der ADVANCE Act die US-amerikanische Aufsichtsbehörde (Nuclear Regulatory Commission, NRC) zu einer Reihe von Maßnahmen im Bereich der Genehmigung neuer Reaktoren und Brennstoffe. Dazu gehören die Verbesserung des regulatorischen Rahmens für fortschrittliche Reaktoren und Fusionstechnologien sowie die Förderung von Initiativen, die effiziente, zeitnahe und planbare Genehmigungsverfahren durch die NRC unterstützen. /AEA 24/

Die NRC legte im Dezember 2024 der Kommission<sup>8</sup> in SECY-24-0085 „Proposed Rule: Regulatory Framework for Fusion Machines“ einen Entwurf eines Regulierungsvorschlags sowie den dazugehörigen Leitlinienentwurf NUREG-1556, Band 22, „Consolidated Guidance About Materials Licenses: Program-Specific Guidance About Possession Licenses for Fusion Machines“ vor. Der Regulierungsvorschlag wurde speziell auf die besonderen Eigenschaften und Sicherheitsanforderungen von Fusionsanlagen zugeschnitten. Unter anderem beinhaltet er die Definition von Fusionsanlagen als Maschinen, die in der Lage sind, Atomkerne durch Fusionsprozesse in verschiedene Elemente, Isotope oder andere Teilchen umzuwandeln und die entstehenden Produkte, einschließlich Teilchen, Wärme oder anderer elektromagnetischer Strahlung, direkt aufzufangen und zu nutzen.

Des Weiteren wurde im März 2025 das „NRC’s Vision and Strategy Paper: Regulating Fusion Machines“ veröffentlicht. In diesem wird nicht nur auf NUREG-1556 Band 22 bezüglich der Regulierung von Fusionsanlagen verwiesen, sondern auch auf Part 30 „Rules of General Applicability to Domestic Licensing of Byproduct Material“ des Title 10, Code of Federal Regulations /NRC 25/. Die Anforderungen der NRC in 10-CFR-Part-30 und die Leitlinien in Band 22 des NUREG-1556 sollen die Skalierbarkeit in Situationen regeln, in denen große Mengen an Tritium oder Aktivierungsprodukten zusätzliche Maßnahmen erfordern. Beispiele hierfür sind Umweltprüfungen, Notfallvorsorge (Notfallpläne und -verfahren) und Abfallentsorgung (z. B. bereits gut erforschte radioaktive Abfälle oder neuartige Aktivierungsprodukte).

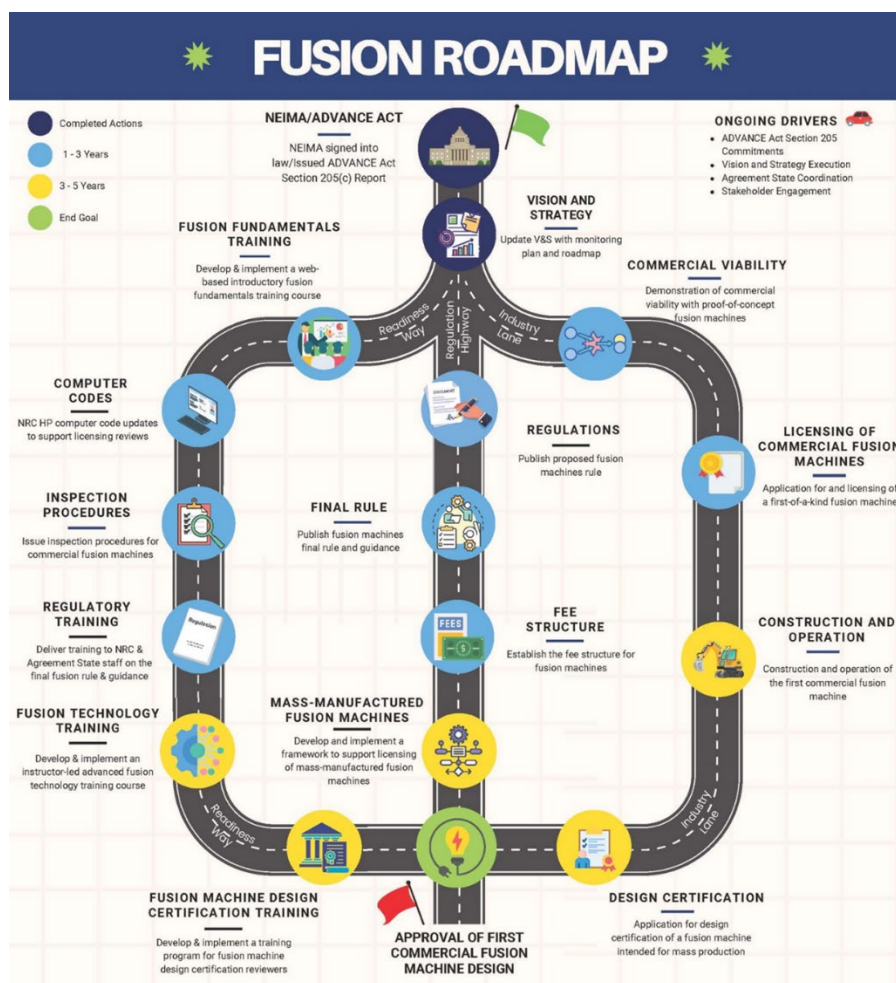
Die NRC hat in Abstimmung mit den Vertragsstaaten (agreement states)<sup>9</sup> einen Plan entwickelt, um die Einführung der kommerziellen Fusionstechnologie möglich zu machen. Abb. 5.1 stellt die Pfade mit Meilensteinen dar, die für die erste Designzertifizierung kommerzieller Fusionsanlagen erreicht werden müssen: technische Einsatzbereitschaft, regulatorische Vorbereitung und Fortschritt der Industrie. Ziel ist ein risikobasierter, leistungsorientierter und designspezifischer Regulierungsrahmen für Fusionsanlagen, der den Bedürfnissen der Fusionsindustrie gerecht wird.

---

<sup>8</sup> Die NRC unterscheidet zwischen ihrem Personal (staff) und den fünf Mitgliedern der Kommission (commissioners).

<sup>9</sup> Vertragsstaaten haben mit der NRC ein Abkommen geschlossen, welches ihnen die Befugnis zur Genehmigung und Inspektion von „byproduct, source or special nuclear materials“ einräumt, die innerhalb ihrer Staatsgrenzen verwendet oder besessen werden.

Bezüglich weiterer Entwicklungen die Fusionsregulierung betreffend, hat der US-Bundesstaat Massachusetts im Jahr 2022 ein Gesetz verabschiedet, das Fusionsenergie in die Definitionen von „sauberer Energie“ und „Forschung im Bereich sauberer Energie“ aufnimmt. 2023 folgte ein weiteres Gesetz, das Fusionsenergie in den Standard für erneuerbare Energien aufgenommen hat. Im Oktober 2023 verabschiedete Kalifornien ein Gesetz, das Fusionsenergie von Kernspaltung abgrenzt. Ebenfalls im Oktober 2023 trat in North Carolina das Gesetz zur Förderung sauberer Energie in Kraft, das die Definition von sauberer Energie um Kernenergie und damit auch um Fusionsenergie erweiterte. Schließlich passte Virginia im März 2025 seine Definition von sauberer Energie an und schloss Fusionsenergie mit ein. /JFU 25/



**Abb. 5.1** Grafische Darstellung des NRC-Plans zur Einführung der kommerziellen Fusionstechnologie /NRC 25a/

### 5.3 Großbritannien

Gemäß den Nuclear Installations Regulations von 1971 ist eine „nukleare Anlage“ ein Kernreaktor, der auf Kernspaltung basiert. Daher ist das Office for Nuclear Regulation (ONR), das für die Regulierung von Kernspaltungsanlagen zuständig ist, nicht für Fusionsanlagen zuständig. Das Vereinigte Königreich hat kein fusionspezifisches Regelwerk und reguliert derzeit die Fusionsforschung und -entwicklung als „Aktivität mit radioaktiven Stoffen“. Die zuständigen Aufsichtsbehörden sind die Health and Safety Executive (HSE) und die Environment Agency (EA), die Fusionsanlagen durch die Environmental Permitting Regulations der EA und die Gesetze und Verordnungen der HSE, wie beispielsweise das Health and Safety at Work Act, die Control of Artificial Optical Radiation at Work Regulations, die Control of Electromagnetic Fields at Work Regulations, die Ionising Radiations Regulations und die Radiation (Emergency Preparedness and Public Information) Regulations, reguliert.

Die britische Regierung plant, Anfang der 2040er-Jahre im Rahmen des nationalen Programms „Spherical Tokamak for Energy Production“ (STEP) mit der Stromerzeugung aus Fusionsenergie zu beginnen. Auf Grundlage dieses Programms veröffentlichte der Regulatory Horizons Council (RHC), das britische Beratungsgremium für Regulierungsreformen, im Juni 2021 einen Bericht zur Fusionsenergie. Im Rahmen dieses Berichts wurden drei Regulierungsoptionen untersucht. Die erste Option ist die Weiterführung des bestehenden Regulierungsansatzes, wobei die HSE für die Sicherheit und die EA für den Umweltschutz zuständig wäre. Die zweite Option beinhaltet die Anpassung an die Zuständigkeit der ONR für die Sicherheit, wobei die EA weiterhin für den Umweltschutz zuständig bliebe. Und die dritte Option ist die Erarbeitung eines neuen, fusionspezifischen Ansatzes mit einer neuen Behörde. Der RHC empfahl in seinem Bericht insbesondere die erste Option.

Im Oktober 2021 veröffentlichte das damalige Ministerium für Wirtschaft, Energie und Industriestrategie (Department for Business, Energy & Industrial Strategy, BEIS) die Erklärung „Towards Fusion Energy: The UK Government’s Proposals for a Regulatory Framework for Fusion Energy“ und leitete damit eine zweimonatige öffentliche Konsultation ein. Zu den wichtigsten Themen, zu denen Stellungnahmen eingeholt wurden, gehörten der Arbeitsschutz und die öffentliche Gesundheit und Sicherheit, Umweltschutz und Baugenehmigung, die Haftung Dritter und die Sicherheit radioaktiver Materialien und entsprechende Schutzmaßnahmen. Im Juni 2022 veröffentlichte die britische Regierung die Stellungnahme „Towards Fusion Energy: Government Response“ und bestätigte,

dass die künftige Regulierungspolitik für Fusionsanlagen, unabhängig davon, ob sie öffentlich oder privat geführt werden, der im vorherigen Abschnitt beschriebenen ersten Option folgen wird (EA und HSE als Hauptgenehmigungs- und -aufsichtsbehörde), wobei anderen Behörden Befugnisse nach Bedarf übertragen werden können. Außerdem wurden Pläne zur Änderung im Rahmen des Energiesicherheitsgesetzes angekündigt, um Fusionsanlagen von den nuklearen Genehmigungspflichten gemäß dem Nuclear Installations Act von 1965 auszunehmen. Im Oktober 2023 fiel die Veröffentlichung von „Towards Fusion Energy 2023: Next Steps for the UK Fusion Strategy“ mit dem Inkrafttreten des Energiegesetzes 2023 zusammen, welches Fusionsanlagen formell vom Nuclear Installations Act 1965 ausnahm. In der aktuellen Fassung des Gesetzes heißt es nun unter „Restriction of certain nuclear installations to licensed sites“ (2A) das eine „fusion energy facility“ keinen Kernreaktor darstellt und in (2B) wird erläutert, was unter „fusion energy facility“ zu verstehen ist, nämlich ein Standort, der zum Bau oder Betrieb einer Anlage genutzt wird, die für die Erzeugung von elektrischer Energie oder Wärme durch Fusion konzipiert oder angepasst ist, und nicht gleichzeitig zum Bau oder Betrieb eines Kernreaktors genutzt wird. /JFU 25/, /LGU 25/

Die übergeordnete nationale Energiepolitikleitlinie (National Policy Statement for Energy, NPS EN-1) legt die Notwendigkeit bestimmter Energieinfrastrukturen und allgemeine Bewertungsgrundsätze dar, während fünf weitere NPS technologiespezifische Bewertungsgrundsätze festlegen. Um der Industrie, den Aufsichtsbehörden und der Öffentlichkeit Sicherheit hinsichtlich des Planungsprozesses und der Richtlinien für die Entwicklung der Fusionsenergie zu geben, wurde im Mai 2024 das NPS EN-8 für Fusionsenergie vorgeschlagen. Dieses würde in Verbindung mit EN-1 die Bewertungsgrundsätze festlegen, die Antragsteller bei der Standortwahl ihrer Fusionsenergieanlagen berücksichtigen müssen. Folgende Vorschläge waren unter anderem in EN-8 enthalten:

- Verfolgung eines technologieoffenen Ansatzes (alle Fusionstechnologien enthalten),
- offener, entwicklerorientierter Ansatz, Standortcharakterisierung anhand von festgelegten Kriterien und Überlegungen (Strahlenschutz, Umweltschutz und betriebliche Anforderungen),
- die Mindestleistungsschwelle von 50 MW im Planungsgesetz 2008 soll aufgehoben werden,
- Änderung des Planungsgesetzes 2008 dahingehend, dass die Leistung einer Energieerzeugungsanlage sowohl elektrische als auch thermische Energie umfasst.

Fusionsenergie kann eine wichtige Rolle bei der Erzeugung von Hochtemperaturwärme für industrielle Prozesse wie die Wasserstoffproduktion oder die Meerwasserentsalzung spielen.

Die Regierung hat unter anderem folgende Entscheidungen getroffen: Im Einklang mit dem technologieoffenen Ansatz umfasst EN-8 alle Fusionstechnologien mit Ausnahme von Fusions-Spaltungs-Hybriden. Außerdem wurde entschieden, Forschungseinrichtungen nicht in den Anwendungsbereich von EN-8 einzubeziehen und die 50-MW-Schwelle im Planungsgesetz 2008 nicht zu ändern. Daher ist eine Definition einer Fusionsenergieanlage zur Unterscheidung zwischen Forschungs- und kommerziellen Anlagen nicht erforderlich. Weiterhin werden keine separaten Kriterien für unterschiedliche Technologien festgelegt, um mehr Flexibilität zu ermöglichen, ohne dabei eine bestimmte Technologie zu benachteiligen oder zu bevorzugen. Die Entwicklung des NPS EN-8 wird fortgesetzt, um die Fusion mit anderen vergleichbaren Technologien in Einklang zu bringen, den Planungsprozess zu optimieren, eine geeignete Standortwahl sicherzustellen und die Auswirkungen auf Umwelt und Bevölkerung zu minimieren. /GOV 25/

#### **5.4 Japan**

Die Kernenergiegewinnung und die Nutzung von Radioisotopen in Japan unterliegen primär dem Gesetz zur Regulierung von Kernenergiequellen, Kernbrennstoffen und Reaktoren (Act on the Regulation of Nuclear Source Material, Nuclear Fuel Material and Reactors) bzw. dem Gesetz zur Regulierung von Radioisotopen (Act on the Regulation of Radioisotopes and Related Matters). Es bestehen Unterschiede hinsichtlich des Geltungsbereichs und der Anwendung der Regelungen zwischen Kernspaltungsreaktoren und Fusionsanlagen. Das Atomgesetz (Gesetz Nr. 186 von 1955) legt die Grundprinzipien der japanischen Kernenergiepolitik fest. In Artikel 3 Absatz 1 des Gesetzes wird „Kernenergie“ als „alle Energiearten, die bei Kernumwandlungen aus Atomkernen freigesetzt werden“ definiert. Dies schließt sowohl Kernspaltungs- als auch Kernfusionsreaktionen ein. Das in Fusionsanlagen verwendete Tritium ist hingegen gemäß Artikel 3 Absatz 2 des Atomgesetzes kein „Kernbrennstoff“ im Sinne von Artikel 1 des Gesetzes zur Regulierung von Kernenergiequellen, Kernbrennstoffen und Reaktoren und daher nicht als „Kernbrennstoff“ definiert, wodurch Fusionsanlagen nicht als „Reaktoren“ im Sinne des Atomgesetzes gelten. Beispielsweise werden JT-60SA, eine supraleitende Plasmaanlage vom Tokamak-Typ, und ähnliche Anlagen als „Plasmaerzeugungsanlage (mit Deuterium als Brennstoff)“ reguliert, was gemäß dem Gesetz zur Regulierung von

Kernenergiequellen, Kernbrennstoffen und Reaktoren eine „Art von Strahlungserzeugungsanlage“ darstellt. Da dieses Gesetz die Verwendung von Tritium als Brennstoff jedoch nicht zulässt, sind Regulierungsänderungen erforderlich, um die Verwendung von Tritium als Brennstoff in Plasmageneratoren zu ermöglichen.

Der japanische Fusionsenergierrat „J-Fusion“ hat im Jahr 2025 ein White Paper /JFU 25/ zur Regulierung und Sicherheit der Fusionsenergie veröffentlicht. Das Dokument enthält einen Ansatz zur Regulierung der Fusion in Japan und kommt zu dem Schluss, dass sich das Risikopotenzial der Fusion grundlegend von dem der Kernspaltung unterscheidet und die Fusionsregulierung risikobasiert, verhältnismäßig und auf wissenschaftlichen Erkenntnissen beruhend sein sollte.

In Kapitel 4.2 „Aktueller Regulierungsrahmen für Kernenergie und Strahlung“ des White Papers werden sowohl die Position des Gesetzes über Atom- und Fusionsenergie als auch der aktuelle Rechtsrahmen in Japan dargestellt. Kapitel 4.3 beschreibt die Sicherheitsüberlegungen bei der Entwicklung von Fusionsenergie. Dies beinhaltet bisherige Diskussionen über Fusionsenergievorschriften in Japan, internationale Ansätze zur Weiterentwicklung der Fusionsenergie (aus den IAEA Fusion Key Elements) sowie die Fortschritte bei der Überprüfung der aktuellen Vorschriften. Zudem enthält das White Paper einen umfassenden Überblick über die Geschichte und die regulatorischen Überlegungen zur Fusion weltweit und befürwortet die Anwendung bestehender Rechtsrahmen, insbesondere des Strahlenschutzgesetzes, auf Fusionsanlagen, um eine Überregulierung zu vermeiden und gleichzeitig die Sicherheit zu gewährleisten. /JFU 25/

Japan strebt eine Fusionsregulierung unter dem Radioisotopengesetz und nicht dem Gesetz für Kernspaltungsreaktoren an, um die Entwicklung eines risikobasierten Regulierungsrahmens zu unterstützen, der verhältnismäßige Sicherheitsmaßnahmen ermöglicht, ohne unnötige Belastungen aufzuerlegen, die Innovationen behindern könnten. Dieser Schritt deckt sich weitgehend mit der Entscheidung der US-Atom Aufsichtsbehörde (NRC) aus dem Jahr 2023, die Kernfusion getrennt von der Kernspaltung zu regulieren. /FIA 25a/

## **5.5 Kanada**

Die kanadische Atomaufsichtsbehörde (Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC) reguliert neben der Nutzung von Kernenergie und -materialien auch Fusionsanlagen und

-aktivitäten, da diese ebenfalls dem Atomgesetz (Nuclear Safety and Control Act, NSCA) unterliegen. Kleine fusionsbasierte Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen werden gemäß den Vorschriften für nukleare Anlagen und Ausrüstung der Klasse II genehmigt. Angesichts des wachsenden nationalen und internationalen Interesses an Fusionsenergie wird der Regulierungsrahmen aktualisiert, da er nicht alle Aspekte der Fusionstechnologie abdeckt, insbesondere in den Bereichen Entwicklung, Kommerzialisierung und Einsatz. Kanada mangelt es unter anderem an Richtlinien, die die Zusammenarbeit und Investitionen der Regierung auf verschiedenen Ebenen (Bundes-, Provinz- und Kommunalebene) erleichtern und fördern würde. Obwohl das mit der Fusionstechnologie verbundene Risiko der Weiterverbreitung von Kernwaffen als gering eingeschätzt wird, wird Tritium voraussichtlich zusätzlichen internationalen Nichtweiterverbreitungsanforderungen der IAEA unterliegen. Ausgewählte Fusionstechnologien könnten Exportkontrollen unterliegen.

Im Jahr 2024 veröffentlichte die CNSC ein Positionspapier, welches erläutert, dass für Fusionsanlagen und -aktivitäten ein risikobasierter Ansatz verfolgt wird. Es wurde auch das Diskussionspapier „DIS-25-01, Regulatory Readiness for Fusion“ veröffentlicht, welches den konzeptionellen Rahmen für die Regulierung von Fusionsenergie und -technologie enthielt und vom 5. Juni bis 4. August 2025 zur öffentlichen Kommentierung auslag. Das erhaltene Feedback wird in mögliche Überarbeitungen und Verbesserungen des gesamten Regulierungsrahmens einfließen. Die Überarbeitung des Regulierungsrahmens für Fusionstechnologien soll bis 2026 abgeschlossen sein. /CNS 25/

## **5.6 IAEA TECDOC 2115 „International Experience in the Regulation of Fusion Facilities“**

Der TECDOC 2115 /IAE 26/ besteht aus fünf Kapiteln und zwei Anhängen. Das einleitende Kapitel 1 stellt unter anderem den Hintergrund und die Ziele des TECDOC dar, in Kapitel 2 werden die regulatorischen Vorgehensweisen unterschiedlicher Länder, darunter Kanada, China, Frankreich und Deutschland, zusammengefasst dargestellt, die Kapitel 3 und 4 befassen sich mit häufigen regulatorischen Fragen bzw. regulatorischen Ansätzen. In Kapitel 5 werden Prioritätsbereiche für die Entwicklung und Überarbeitung regulatorischer Rahmenbedingungen für zukünftige Fusionsanlagen diskutiert. Dies umfasst Themen wie beispielsweise die internationale Harmonisierung der Regulierung, die einheitliche Verwendung der Terminologie sowie die Anwendung eines abgestuften Ansatzes für regulatorische Rahmenbedingungen. Anhang 1 stellt ergänzende Beispiele

und Informationen zur Regulierung von Fusionsanlagen der in Kapitel 2 aufgeführten Länder dar und Anhang 2 enthält Schlüssel-Überlegungen für eine effektive Regulierung.

Der TECDOC zeigt, dass viele Staaten prüfen, wie neue Technologien und komplexere Betriebsabläufe von Fusionsanlagen in bestehende regulatorische Rahmen integriert werden können, was sämtliche Genehmigungsphasen von Standortwahl bis Stilllegung betrifft. Da Fusion in vielen Ländern nicht eindeutig durch bestehende nukleare Regelwerke abgedeckt ist und ihr Gefährdungsprofil deutlich von dem der Kernspaltung abweicht, fehlen spezifische Leitlinien und etablierte Aufsichtsansätze. Zudem besteht Bedarf an klaren Prozessen für den Austausch zwischen Entwicklern, Behörden und internationalen Organisationen sowie an strukturierten Konzepten für öffentliche Beteiligung, um Transparenz zu fördern und potenzielle Regelungslücken frühzeitig zu erkennen.

Weiterhin wird festgestellt, dass sich die Regulierung von Fusionsanlagen zwischen detaillierten, vorschriftenbasierten Vorgaben und flexibel ausgelegten, zielorientierten Ansätzen bewegt, wobei viele Staaten zunehmend technologieoffene, risikobasierte und zielvorgabenorientierte (risk-informed and performance-based) Modelle verfolgen. Selbst in überwiegend zielorientierten Ansätzen bleiben bestimmte präskriptive Anforderungen notwendig, wenn sie dem Schutz von Menschen und Umwelt vor ionisierender Strahlung dienen. Angesichts der weltweit sehr unterschiedlichen Anlagenkonzepte und Gefährdungsniveaus gewinnt zudem ein abgestufter Ansatz (Graded Approach) an Bedeutung, bei dem Sicherheitsanforderungen proportional zum radiologischen Risiko festgelegt, Risiken über den gesamten Lebenszyklus regelmäßig bewertet und Anlagen nach ihrem inhärenten Gefährdungspotenzial – einschließlich aller radioaktiven Materialien und Worst-Case-Szenarien – klassifiziert werden.

Der TECDOC betont die Bedeutung eines frühen, engen Austauschs zwischen Entwicklern und Aufsichtsbehörden, um technische Besonderheiten, Sicherheitsfragen und mögliche Regulierungslücken rechtzeitig zu erkennen und klare gesetzliche Zuständigkeiten zu schaffen. International wird eine stärkere Harmonisierung der Regelwerke sowie eine einheitliche Terminologie empfohlen, um Verfahren zu vereinfachen und Anträge vergleichbar zu machen. Zudem sollen geeignete, oft mehrstufige Genehmigungsstrategien den Dialog strukturieren, Entwicklungsschritte absichern und bei Bedarf Instrumente wie Standort- oder Designvorabgenehmigungen einbinden.

Für künftige Fusionsanlagen müssen Anforderungen flexibel und dem Risiko angemessen skaliert werden, da sich Technologien, Betriebsweisen und Gefährdungspotenziale stark unterscheiden. Deshalb sollten Sicherheits-, Umwelt- und Notfallschutzmaßnahmen proportional zum Risiko ausgelegt und Unsicherheiten vorerst durch konservative Annahmen oder zusätzliche technische Schutzmaßnahmen abgedeckt werden. Ergänzend braucht es flexible, leistungsorientierte Leitfäden und fusionspezifische Standards – etwa zu Tritium Handling, Cyber-Sicherheit, Strahlenschutz und Abfallmanagement – sowie agile Aufsichtsbehörden, die technologische Entwicklungen früh erkennen und regulatorische Herausforderungen vorausschauend adressieren. /IAE 26/



## 6 Fazit

### **Ereignisablaufanalysen zu Auslösenden Ereignissen in europäischen DEMO-Konzepten**

Die Ergebnisse der Recherche zu neu veröffentlichten Ereignisablaufanalysen für DEMO deuten darauf hin, dass seit der Veröffentlichung von /GRS 23/ keine großen Fortschritte hinsichtlich solcher Analysen erzielt wurden. Einerseits liegen für viele der in /PIN 17/ aufgelisteten Auslösenden Ereignisse und ebenso für Einwirkungen von außen nach wie vor keine Analysen vor. Andererseits sind die zwischenzeitlich veröffentlichten und in diesem Bericht kurz zusammengefassten Untersuchungen von einer geringen Detailtiefe geprägt. Die Ursachen hierfür könnten an folgenden Umständen liegen:

- Da die DEMO-Konzepte noch nicht ausreichend konkretisiert sind, fehlt derzeit vermutlich noch die fachliche, insbesondere ingenieurtechnische, Grundlage, um Ereignisabläufe so weit zu spezifizieren, dass sie realistisch modelliert werden können.
- Für die vollständige Modellierung der Ereignisabläufe fehlen eventuell auch noch die erforderlichen Programmmodule sowie die erforderlichen Rechenkapazitäten.
- Da die involvierten Fachleute die Kernfusion meist als deutlich weniger risikobehaftet ansehen als die Kernspaltung, fehlt eventuell auch das Bewusstsein für die Notwendigkeit umfassender Ereignisablaufanalysen.

Unabhängig von den Ursachen ist auf Basis der verfügbaren Untersuchungen derzeit keine abschließende Risikobewertung der bei Fusionskraftwerken nach dem Tokamak-Prinzip (d. h. den DEMO-Konzepten) zu unterstellenden Störfälle möglich. Dies gilt sowohl hinsichtlich technischer Aspekte der Ereignisabläufe als auch hinsichtlich der potenziell resultierenden radioaktiven Freisetzungen bzw. der Strahlenbelastung des Personals. Ob auf dieser Grundlage in absehbarer Zeit ein Genehmigungsverfahren möglich wäre, hängt von den konkreten regulatorischen Anforderungen an Sicherheitsnachweise für Fusionskraftwerke ab.

### **Sicherheitstechnische Aspekte bei Trägheitsfusions-Anlagen**

Trotz signifikanter wissenschaftlicher Fortschritte steht die Trägheitsfusion weiterhin vor grundlegenden technologischen und systemischen Herausforderungen. Zwar wurde mit einzelnen Experimenten zur Zündung von Plasmen ein wichtiger physikalischer Machbarkeitsnachweis erbracht, jedoch existiert bislang kein belastbares Anlagenkonzept,

das die für ein Kraftwerk erforderlichen Wiederholraten, Energiekopplungseffizienzen und Materialstandzeiten erreicht. Insbesondere bleiben die Steigerung der Laser- und Treibereffizienz, die automatisierte Fertigung qualitativ homogener Targets sowie die Auslegung einer Reaktionskammer, die Milliarden zyklischer Hochleistungsimpulse „schadlos“ übersteht, bislang ungelöste Schlüsselaufgaben.

Die Recherchen haben weiterhin gezeigt, dass sicherheitstechnische Bewertungen derzeit nur auf konzeptioneller Ebene möglich sind. Die extremen thermischen und mechanischen Lasten sowie die intensive Neutronen- und Ionenstrahlung erfordern Werkstoffe und Komponenten, deren Leistungsfähigkeit bislang nicht für ICF-Betriebsbedingungen nachgewiesen ist. Dies betrifft insbesondere die Erste Wand, Blanketmaterialien und optische Komponenten. Auch andere sicherheitsrelevante Systeme, wie etwa der Tritiumkreislauf, Fernwartungssysteme oder Diagnostik, befinden sich erst in einem frühen Entwicklungsstadium; robuste Auslegungen oder validiertes Betriebsverhalten liegen nicht vor. Damit ist die sicherheitstechnische Betrachtung notwendigerweise qualitativ und mit großen Unsicherheiten behaftet.

Zusammenfassend hat sich gezeigt, dass die Trägheitsfusion ein hohes technologisches Potenzial besitzt, dessen Realisierung jedoch substanzielle Fortschritte in der Laserphysik, Werkstofftechnik, Systemintegration und Sicherheitsforschung voraussetzt. Erst auf dieser Basis wird eine belastbare sicherheitstechnische Bewertung und perspektivisch die Entwicklung prototypischer ICF-Kraftwerksanlagen erfolgen können.

### **Aktuelle regulatorische Entwicklungen**

Die Recherchen zu aktuellen regulatorischen Entwicklungen haben gezeigt, dass weltweit große Fortschritte beim Aufbau regulatorischer Rahmenbedingungen für Fusionsanlagen erzielt werden, diese sich jedoch noch in einer dynamischen Entwicklungsphase befinden. Während Deutschland plant, die Fusion explizit im Strahlenschutzgesetz zu verankern und damit klar vom Atomrecht abzugrenzen, haben die USA bereits einen eigenen, risikobasierten Regulierungsansatz geschaffen und die Fusion formal von der Kernspaltung getrennt. Großbritannien verfolgt ebenfalls einen technologieoffenen, verhältnismäßigen Ansatz (in Bezug auf das Gefährdungspotenzial der jeweiligen Anlage) und hat Fusionsanlagen rechtlich vom klassischen Nuklearrecht ausgenommen. Japan und Kanada arbeiten aktuell an risikobasierten Regulierungen, die Fusion unter bestehender Strahlenschutz- bzw. Nuklearaufsicht einordnen, jedoch spezifische Anpassungen vorsehen. Der IAEA TECDOC 2115 unterstreicht den globalen Trend zu flexiblen,

stufenweise angewendeten Regulierungsmodellen, die sich stärker an realen Risiken orientieren und internationale Harmonisierung fördern sollen. Insgesamt wird deutlich, dass ein tragfähiges Regulierungssystem für die Fusion entsteht, jedoch weiterhin Präzisierungen, internationale Abstimmung und die enge Zusammenarbeit zwischen Industrie und Aufsichtsbehörden notwendig sind.



## Literaturverzeichnis

- /AEA 24/ Atomic Energy Act of 1954, online: [Atomic Energy Act](#), Enacted July 2024.
- /AGA 24/ Agatsuma, K., Suzuki, K., Sugimoto, T. et al., Paper: Horizontal homing laser for high repetitive inertial fusion, online: [Horizontal homing laser for high repetitive inertial fusion](#), Nuclear Fusion, Volume 64, Number 9, August 2024.
- /ASP 25/ Asianpower, Article: EX-Fusion secures \$18.1m funding for nuclear fusion development, online: [ex-fusion-secures-181m-funding-nuclear-fusion-development](#), June 2025.
- /BAD 12/ Badziak, J., Laser nuclear fusion: Current status, challenges and prospect, online: [Laser nuclear fusion Current status challenges and prospect](#), Article in Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, December 2012.
- /BEV 25/ Bevelacqua, J., Health Physics Aspects of an Inertial Confinement Fusion Power Facility, online: [Health Physics Aspects of an Inertial Confinement Fusion Power Facility](#), May 2025.
- /BIE 25/ Binding Energy, Inertial Fusion: A Laser-Powered Path to the Future – The Vision of Focused Energy, online: [inertial-fusion-energy](#), aufgerufen August 2025.
- /BLF 25/ Blue Laser Fusion, Homepage, Technology: Pioneering Clean Energy Solutions, online: [Pioneering Clean Energy Solutions](#), aufgerufen August 2025.
- /BUS 25/ Business Insider, Hofmann, A., Gründerszene, Artikel: Marvel Fusion erweitert Serie B-Finanzierung auf 113 Millionen Euro, online: [/marvel-fusion-erweitert-series-b-finanzierung-auf-113-millionen-euro](#), März 2025.

- /CAL 24/ Callahan, D. A., A Prospectus on laser-driven inertial fusion as an energy source, online: [A prospectus on laser-driven inertial fusion as an energy source](https://doi.org/10.1063/5.0232701), <https://doi.org/10.1063/5.0232701>, Physics of Plasma, Volume 31, Issue 12, December 2024.
- /CAR 22/ Caruso, G., et al.: 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 176 (2022) 113025, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2022.113025>, February 2022.
- /CHA 20/ Chapman, I. T., Walkden, N. R., Article: An overview of shared technical challenges for magnetic and inertial fusion power plant development, online: [An overview of shared technical challenges for magnetic and inertial fusion power plant development](#), Philosophical Transactions of the Royal Society, Volume 379, Issue 2189, December 2020.
- /CIU 21/ Ciurluini, C., et al.: Study of the EU-DEMO WCLL Breeding Blanket Primary Cooling Circuits Thermal-Hydraulic Performances during Transients Belonging to LOFA Category. Energies 2021, 14, 1541, <https://doi.org/10.3390/en14061541>, March 2021.
- /CIU 23/ Ciurluini, C., et al.: Transient analysis of a locked rotor/shaft seizure accident involving the EU-DEMO WCLL Breeding Blanket primary cooling circuits. Fusion Engineering and Design, Volume 187, 113396, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2022.113396>, February 2023.
- /CNS 10/ Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC): Health Effects, Dosimetry and Radiological Protection of Tritium. Part of the Tritium Studies Project, INFO-0799, ISBN 978-1-100-15583-8, [https://api.cnsccsn.gc.ca/dms/digital-medias/CNSC\\_Health\\_Effects\\_Eng-web.pdf/object](https://api.cnsccsn.gc.ca/dms/digital-medias/CNSC_Health_Effects_Eng-web.pdf/object), April 2010.
- /CNS 25/ Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC), Nuclear safety – Acts and regulations, online: [acts-and-regulations/fusion](#), October 2025.

- /DAY 22/ Day, C., et al.: The pre-concept design of the DEMO tritium, matter injection and vacuum systems. Fusion Engineering and Design, Volume 179, 113139, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2022.113139>, April 2022.
- /DOE 22/ U.S. Department of Energy, DOE, Office of Science, Report of the Fusion Energy Science Workshop on Inertial Fusion Energy, online: [IFE-Basic-Research-Needs-Final-Report](#), 2022.
- /DPG 25/ Deutsche Physikalische Gesellschaft, DPG, Plasmaphysik – Trägheitseinschluss, online: [Traegheitseinschluss](#), aufgerufen Juli 2025.
- /FIA 25/ Fusion Industry Association: The global fusion industry in 2025 – Fusion Companies Survey by the Fusion Industry Association, online: [Global-Fusion-Industry-Report 2025](#), 2025.
- /FIA 25a/ Fusion Industry Association, Article: Japan Fusion Energy Council Publishes Paper on Fusion Regulations, online: [japan-fusion-energy-council-publishes-paper-on-fusion-regulations](#), July 2025.
- /FND 25/ Finanz Nachrichten, Article: Blue Laser Fusion Inc.: Blue Laser Fusion Wins US Department of Energy 2025 INFUSE Project Award, online: [blue-laser-fusion-wins-us-department-of-energy-2025-infuse-project-award](#), October 2025.
- /FOC 25/ Focused Energy – Homepage, Technology, online: [Focused Energy Technology](#), aufgerufen August 2025.
- /GLO 25/ GlobeNewswire, Article: Pacific Fusion and General Atomics Team Up to Deliver Breakthroughs in Inertial Fusion Energy, online: [Pacific-Fusion-and-General-Atomics-Team-Up-to-Deliver-Breakthroughs-in-Inertial-Fusion-Energy](#), April 2025.
- /GOV 25/ UK Government, Department for Energy Security & Net Zero, Consultation outcome – New National Policy Statement for fusion energy: government response, online: [new-national-policy-statement-and-proposals-on-siting](#), July 2025.

- /GRS 23/ Kowalik, M., Thuma, G., Verfolgung sicherheitstechnischer Fragestellungen von Fusionsanlagen zur Erzeugung elektrischer Energie, online: [grs-724](#), GRS – 724, April 2023.
- /IAE 26/ International Atomic Energy Agency, IEAE, TECDOC 2115 - International Experience in the Regulation of Fusion Facilities, online: [TECDOC 2115](#), 2026.
- /ILI 26/ Intense Laser Irradiation Laboratory, ILIL, National Institute of Optics – National Council of Research, Article: Shock Ignition and Inertial Confinement Fusion, online: [Shock Ignition and Inertial Confinement Fusion](#), aufgerufen Februar 2026.
- /JFU 25/ J-Fusion, Fusion Energy White Paper, online: [J-Fusion White Paper](#), Version June 2025.
- /KHA 23/ Khani, S., et al.: Modelling LOFA scenario for WCLL BB concept using MELCOR1.8.5 code. Fusion Engineering and Design, Volume 194, 113927, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113927>, September 2023.
- /LGU 25/ UK Legislation, Nuclear Installations Act 1965 – Changes to legislation, online: [Nuclear Installations Act 1965](#), November 2025.
- /LIT 21/ Litnovsky, A., Duran, I. et al., Fusion – Reactor Materials, online: [FUSION-REACTOR-MATERIALS](#), Encyclopedia of Nuclear Energy, Elsevier 2021.
- /LUK 20/ Lukacs, M., and Williams, L. G.: Nuclear safety issues for fusion power plants. Fusion Engineering and Design, Volume 150, 111377, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.111377>, 2020.
- /MAR 25/ Marvel Fusion – Homepage, Article: Milestone for Fusion Research: Inauguration of Marvel Fusion’s New Experimental Chamber “LION 2” at CALA in Garching/Munich, online: [chamber lion 2 at CALA Garching](#), July 2025.

- /MKS 25/ MKS – Homepage, Article: Essential of Laser Safety, online: [Essentials of Laser Safety](#), aufgerufen Januar 2026.
- /NAA 13/ National Academis, An Assessment of the Prospects for Inertial Fusion Energy – Chapter 3: Inertial Fusion Energy Technologies, National Research Council, online: [Inertial Fusion Energy Technologies](#), 2013.
- /NEI 25/ Nuclear Engineering International, Article: Focused Energy and Amplitude ink laser fusion deal, online: [focused-energy-and-amplitude-ink-laser-fusion-deal](#), January 2025.
- /NRC 25/ United States Nuclear Regulatory Commission, Part 30 – Rules of General Applicability to Domestic Licensing of Byproduct Material, online: [part 30, Title 10, Code of Federal Regulations](#), October 2025.
- /NRC 25a/ United States Nuclear Regulatory Commission, Fusion Program Roadmap, online: [Fusion Program Roadmap](#), November 2025.
- /OBE 15/ Obenschain, S., Lehmberg, R., Kehne, D., et.al, Article: High-energy krypton fluorid lasers for inertial fusion, online: [High-energy krypton fluorid lasers for inertial fusion](#), Applied Optics, Vol. 54, Issue 31, pp. F103-F122, 2015.
- /OPT 25/ Optics News, Article: Xcimer Energy completes first private-sector electron-beam excimer laser, online: [Xcimer Energy Completes First Private-Sector Electron-Beam Excimer Laser - Xcimer Energy Corporation](#), June 2025.
- /ORL 24/ Oak Ridge National Laboratory, Infuse Awards: High Energy Pulsed Laser Amplification Using Optical Enhancement Cavities, online: [high-energy-pulsed-laser-amplification-using-optical-enhancement-cavities](#), August 2024.
- /PAF 25/ LeChien, K., Pacific Fusion, Pacific Fusion announces expansion to New Mexico with new Research and Manufacturing Campus, online: [pacific-fusion-announces-expansion-to-new-mexico-with-new-research-and-manufacturing-campus](#), September 2025.

- /PAT 25/ Pattison, M., Blue Laser Fusion, Progress on the BLF Laser-OEC Platform for IFE, online: [Progress on the BLF Laser-OEC Platform for IFE](#), ARPA-E Fusion Programs Annual Review Meeting, July 2025.
- /PIE 97/ Piet, S. J., Brereton, S. J. et al, Overview of Safety and Environmental Issues for Inertial Fusion Energy, online: [Overview of Safety and Environmental Issues for Fusion Energy](#), Journal of Fusion Energy 16(2), p 133-140, June 1997.
- /PIN 17/ Pinna, T, et al.: Identification of accident sequences for the DEMO plant. Fusion Engineering and Design, Volume 124, pp. 1277 – 1280, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.02.026>, 2017.
- /RAE 25/ Raetzke, C., Artikel: Regulierung der Kernfusion – aktuelle Entwicklungen, International Journal for Nuclear Power – atw, online: [atw-international-journal-for-nuclear-power-062025](#), Juni 2025.
- /RUH 22/ Ruhl, H., Korn, G., Marvel Fusion, A laser-driven mixed fuel nuclear fusion micro-reactor concept, online: [A laser-driven mixed fuel nuclear fusion mirco-reactor concept](#), Germany, 2022.
- /SFC 24/ San Francisco Chronicle, Article: Laser fusion startup moves from Austin to Bay Area, aims to power S.F. with ‘three soda cans’, online: [focused-energy-bay-area-headquarters](#), October 2024.
- /SHA 23/ Shaw, R., and Butler, B.: Initial accident scenario analysis in support of a preliminary DEMO tritium plant design. Fusion Engineering and Design, Volume 189,113482, [Initial accident scenario analysis in support of a preliminary DEMO tritium plant design](#), April 2023.
- /THA 25/ Thales, Article: Thales inaugurates GenF, a first step towards nuclear fusion energy, online: [thales-inaugurates-genf-first-step-towards-nuclear-fusion-energy](#), May 2025.
- /TUD 25/ Technische Universität Darmstadt (TUD), Article: 20 Millionen Euro für Focused Energy, online: [20 Millionen Euro für Focused Energy](#), Dezember 2025.

- /UKA 21/ UK Atomic Energy Authority, Technology Report – Safety and Waste Aspects for Fusion Power Plants, online: [UKAEA-RE2101-Fusion-Technology-Report-Issue-1](#), September 2021.
- /WIN 25/ WinFuture, Artikel: First Light Fusion: Startup gibt Pläne für Fusionskraftwerk jetzt auf, online: [First Light Fusion Pläne](#), April 2025.
- /WNN 24/ World Nuclear News, Article: Focused Energy completes first milestones on US fusion programme, online: [focused-energy-completes-first-milestones-on-us-fusion-programme](#), November 2024.
- /WNN 25/ World Nuclear News, Article: Laser-based fusion plant planned for Biblis site, online: [laser-based-fusion-plant-planned-for-biblis-site](#), March 2025.
- /WNN 25a/ World Nuclear News, Article: Germany's Marvel Fusion raises further EUR113 million, online: [germanys-marvel-fusion-raises-further-eur113-million](#), March 2025.
- /WNN 25b/ World Nuclear News, Article: First Light Fusion presents novel approach to fusion, online: [first-light-fusion-presents-novel-approach-to-fusion](#), September 2025.
- /XCI 25/ Xcimer - Homepage, online: [xcimer.energy](#), aufgerufen July 2025.



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Übersicht der Kühlkreisläufe von DEMO nach /CIU 23/.....	7
Abb. 2.2	Äquatoriale Zelle eines Blankets (central outboard blanket, COB) nach /CIU 23/ .....	7
Abb. 2.3	Isometrie des Blei-Lithium-Kreislaufs nach /KHA 23/.....	9
Abb. 2.4	Isometrie der äquatorialen Blanketzellen (inboard, IB, and central outboard, COB) nach /KHA 23/ .....	9
Abb. 2.5	Zuordnung der Auslösenden Ereignisse im Tritiumkreislauf (TGG1, TGO1, TGO3, THO1 und TWO1) zu Szenarien nach /SHA 23/ .....	13
Abb. 2.6	Schematischer Überblick über den Tritiumkreislauf nach /DAY 22/.....	14
Abb. 3.1	Schematische Darstellung der Phasen der Laserfusion /BAD 12/.....	20
Abb. 3.2	Schematische Darstellung des a) direkten Antriebs und b) indirekten Antriebs der Laserfusion /BAD 12/ .....	21
Abb. 3.3	Schematische Darstellung der grundlegenden Konzepte der Schnellzündung a) ursprüngliches Konzept und b) Kegel-in-Hülle-Konzept /BAD 12/.....	23
Abb. 3.4	Darstellung der Schockzündung /BAD 12/ .....	24
Abb. 3.5	Schema der Stoßzündung mit a) einem Projektil hoher Ordnungszahl und b) DT-Plasma-Projektil /BAD 12/.....	25
Abb. 3.6	Bewertung des Technologiereifegrads (Technology Readiness Level, TRL) sieben entscheidender Aspekte für drei Trägheitsfusionskonzepte /DOE 22/ .....	27
Abb. 3.7	Darstellung der Standortplanung für die Pilotanlagen /PAT 25/.....	33
Abb. 3.8	Schematische Darstellung des Anlagenaufbaus /BLF 25/ .....	33
Abb. 5.1	Grafische Darstellung des NRC-Plans zur Einführung der kommerziellen Fusionstechnologie /NRC 25a/ .....	58



## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Liste repräsentativer Auslösender Ereignisse (PIE) für ein EU-DEMO-Design mit WCLL-Blankets nach /PIN 17/.....	4
Tab. 2.2	Freisetzungen bei einem Ex-Vessel LOCA (LBO1) für die vier in /CAR 22/ simulierten Fälle .....	11
Tab. 2.3	Dosiswerte für den Störfall „Ex-Vessel LOCA“ bei Konzepten mit WCLL-Blankets nach /CAR 22/ .....	12
Tab. 4.1	Geschätzte ICF-Gefahren- und Freisetzungsquellen /BEV 25/.....	47



## Abkürzungsverzeichnis

AtG	Atomgesetz
ATLAS	Advanced Technology Lasers for Application and Science
BEIS	Department for Business, Energy and Industrial Strategy
BK	Brennstoffkapsel
BLF	Blue Laser Fusion
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BSS	Rückwärtige Tragestruktur
BZ	Brutzone
CALA	Centre for Advanced Laser Applications
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
CNSC	Canadian Nuclear Safety Commission
COB	Central Outboard Blanket
CSU	Colorado State University
DEMO	Demonstration Power Plant
DOE	Department of Energy
DT	Deuterium-Tritium
DWT	Double Walled Tubes
EA	Environment Agency
FLARE	Fusion via Low-power Assembly and Rapid Excitation
FLF	First Light Fusion
FW	First Wall
GA	General Atomics
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit
HB	Wasserstoff-Bor
HCPB	Helium cooled Pebble Bed
HCSG	Helicoidal Coil Steam Generators
HEX	Heat Exchanger
HSE	Health and Safety Executive
HTO	Tritiiertes Wasser
IAEA	International Atomic Energy Agency
IB	Inboard Blanket
ICF	Inertial Confinement Fusion
IFE	Inertial Fusion Energy
IOD	Integrated Operation Experimental Device

IRPR	Isotope Rebalancing and Protium Removal System
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
JET	Joint European Torus
JP-60SA	Japan Tokamak 60 Super Advanced
JPY	Japanische Yen
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KrF	Kryptonfluorid
LIDT	Laser Induced Damage Threshold
LiPb	Lithium-Blei
LLNL	Lawrence Livermore National Laboratory
LMU	Ludwig-Maximilian-Universität
LOCA	Loss of Coolant Accident
LOFA	Loss of Flow Accident
LOVA	Loss of Vacuum Accident
LPK	Long Pulse Kinetics
MCF	Magnetic Confinement Fusion
MCP	Main Coolant Pump
NIF	National Ignition Facility
NPS EN	National Policy Statement for Energy
NSCA	Nuclear Safety and Control Act
NRC	Nuclear Regulatory Commission
OEC	Optical Enhancement Cavity
ONR	Office for Nuclear Regulation
Pb	Blei
PHTS	Primärkühlsystem
PIE	Postulated Initiating Events
PORV	Power-Operated Relief Valve
PRZ	Pressurizer
RHC	Regulatory Horizons Council
STEP	Spherical Tokamak for Energy Production
StrlSchG	Strahlenschutzgesetz
TRL	Technology Readiness Level
UK	United Kingdom
UKAEA	United Kingdom Atomic Energy Authority
WCLL	Water Cooled Lithium Lead Blanket
WDS	Water Detritiation System

**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 978-3-911727-50-1**