

HSFK-Report Nr. 7/2013

Safeguarding Fusion Reactors

Plädoyer für eine proliferationsresistente
Gestaltung der Kernfusion

Giorgio Franceschini/Matthias Englert

© Hessische Stiftung Friedens- und Konfliktforschung (HSFK)

Adresse:

HSFK • Baseler Straße 27-31 • D-60329 Frankfurt am Main

Telefon: +49(0)69 95 91 04-0 • Fax: +49(0)69 55 84 81

E-Mail: franceschini@hsfk.de • englert@ianus.tu-darmstadt.de

Internet: www.hsfk.de

ISBN: 978-3-942532-61-7

Euro 6,-

Zusammenfassung

Die Kernfusion ist eine nukleare Zukunftstechnologie, mit der viele Hoffnungen verbunden werden: Sie könnte bis zum Ende des 21. Jahrhunderts zu einer bedeutenden Energiequelle werden und einen beachtlichen Teil der Grundlast im globalen Stromangebot liefern. Ob die Kernfusion aber den kommerziellen Durchbruch schaffen wird, ist heute noch weitgehend ungewiss, sodass im Prinzip drei Energieszenarien für die zweite Hälfte des 21. Jahrhundert denkbar sind: Erstens, die Kernfusion erweist sich als zu anspruchsvoll für die Entwicklung bezahlbarer und zuverlässiger Leistungsreaktoren und wird lediglich als Grundlagen- und Anwendungsforschung (Forschungsreaktoren) weiterverfolgt; zweitens, die Kernfusion etabliert sich innerhalb des globalen Kernenergieangebots als Nischentechnologie und überlässt den herkömmlichen auf Kernspaltung beruhenden Technologien den Löwenanteil am globalen Atomstromangebot. Oder drittens, die Kernfusion setzt sich als zuverlässige und ökonomisch rentable Technologie durch, ist mit den etablierten auf Kernspaltung beruhenden Nukleartechnologien konkurrenzfähig und verdrängt diese langfristig.

In allen drei Szenarien ist davon auszugehen, dass es in den nächsten Jahrzehnten zu einer mehr oder weniger breiten Diffusion kernfusionsbasierter Forschungsreaktoren und möglicherweise auch Leistungsreaktoren kommen könnte. Die Proliferation von Fusions-technologie wird zunächst die teilnehmenden Länder des International Thermonuclear Experimental Reactors (ITER) betreffen, welche gegenwärtig im gleichnamigen Großexperiment die Grundlagen für eine kommerzielle Nutzung der Fusionsenergie untersuchen. Zu den ITER-Mitgliedsländern zählen neben den Atommächten China, Frankreich, Großbritannien, Indien, Russland und die Vereinigten Staaten auch noch alle EU-Nichtkernwaffenstaaten (u.a. die Bundesrepublik Deutschland) sowie Japan und Südkorea.

Dieser Umstand wirft eine doppelte Fragestellung auf: Bietet das ITER-Joint Venture den Atommächten langfristig neue Möglichkeiten der Optimierung und des Ausbaus ihrer Nukleararsenale (vertikale Proliferation)? Welche (horizontalen) Proliferationsrisiken ergeben sich für die ITER-Nichtkernwaffenstaaten aus der Technologiediffusion der Kernfusion?

Der Report kommt dabei für die an ITER beteiligten Atommächte zu folgenden Schlüssen: Ein im Fahrwasser von ITER entwickelter Fusionsreaktor eröffnet einem Kernwaffenland eine zweifache militärische Nutzungsoption. Erstens lassen sich aus dem Fusionsreaktor militärisch relevante Tritiummengen abschöpfen, mit denen existierende Kernwaffen empfindlich verbessert werden können. Das Tritiuminventar eines einzelnen Fusionsreaktors wird dabei die existierenden Tritiumvorräte der Atommächte typischerweise um mindestens eine Größenordnung übersteigen und könnte somit ein ideales Reservoir für dieses ansonsten knappe, flüchtige und instabile Wasserstoffisotop darstellen. Zweitens eröffnen ITER-Nachfolgereaktoren im Prinzip auch die Möglichkeit, im laufenden Betrieb waffenfähiges Spaltmaterial zu produzieren. Dazu müssen zwar gewisse Umrüstungen am Reaktor vorgenommen werden, aber Simulationen haben gezeigt, dass die daraus resultierenden Spaltmaterialproduktionen für militärische Zwecke sowohl quantitativ als auch qualitativ bedeutsam sind. Während die Tritiumabzweigung potentiell alle Atommächte betrifft, da der superschwere Wasserstoff in allen Kernwaffenstaaten

knapp ist (und ständig radioaktiv zerfällt), sind die potentiellen Interessenten für die Spaltmaterialproduktion gegenwärtig nur jene Länder, deren Bestände von den jeweiligen strategischen Eliten als zu gering angesehen werden. Dies sind zurzeit Indien, Pakistan und Nordkorea, wobei lediglich Indien ITER-Mitglied ist. Die Dynamik des globalen Machtübergangs könnte aber langfristig die Spaltmaterialnachfrage zusätzlicher Atomkräfte (z.B. Chinas) anfachen.

Eine rechtliche Handhabe gegen die Tritiumabzweigung oder die Spaltmaterialproduktion für Waffenzwecke ist in Kernwaffenstaaten so gut wie gar nicht gegeben, da es keine entsprechenden Regelungen gibt, welche für diese Staatengruppe hinreichend bindend wären. Mit der Verfügbarkeit größerer Fusionsanlagen, insbesondere in der sogenannten DEMO-Phase (das Zwischenstadium zwischen ITER und den Leistungsreaktoren) wird sich diese Problematik verschärfen, da sich für die meisten Atomkräfte die Zugriffsmöglichkeiten zu waffenfähigem Material drastisch erhöhen werden und die rechtlichen Schranken dagegen noch defizitär sind. Anders verhält es sich für die Nichtkernwaffenstaaten, die am ITER-Projekt beteiligt sind. Auch hier entstehen im Zuge der Technologieentwicklung die beiden oben beschriebenen Zugriffsmöglichkeiten auf Tritium und eventuell spaltbares Material. Während ersteres – auch aus messtechnischen Gründen – schwierig zu kontrollieren sein wird, bietet sich für die Spaltmaterialkontrolle im Prinzip das existierende Safeguardsregelwerk der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) an, welchem sich alle Nichtkernwaffenstaaten, die Mitglied im nuklearen Nichtverbreitungsvertrag (NVV) sind, unterordnen müssen. Aber zurzeit passen die Safeguardsregularien und -prozeduren und die Zukunftstechnologie Kernfusion noch nicht richtig zusammen. Es müssen also rechtliche und technische Anpassungsprozesse vorgenommen werden, um Safeguards in Zukunft auf Fusionsreaktoren anwenden zu können. Das Gemeinschaftsexperiment ITER bietet dazu eine ideale Testumgebung, um technische und prozedurale Elemente einer zukünftigen Safeguardsimplementierung zu testen, da in den nächsten Jahren am Forschungsreaktor ITER Bauteile in verschiedensten Konfigurationen getestet werden sollen.

Die Nichtkernwaffenstaaten, die an ITER beteiligt sind, sollten dabei ehrgeiziger sein und sich nicht darauf beschränken, Maßnahmen zur horizontalen Proliferationsverhinderung zu unterstützen. Sie sollten auch selbstbewusst fordern, dass Safeguardsmaßnahmen grundsätzlich für alle im Fahrwasser von ITER entwickelten Fusionsreaktoren angewendet werden sollen, unabhängig davon ob diese Reaktoren in Kernwaffenstaaten oder in Nichtkernwaffenstaaten stehen. Diese Forderung ist aus zwei Gründen sinnvoll: Erstens profitiert das Gemeinschaftsprojekt ITER sowohl finanziell als auch substantiell von den Beiträgen seiner Nichtkernwaffenmitglieder, allen voran der Bundesrepublik Deutschland, Japan und Südkorea. Es ist ein legitimes Interesse dieser Staaten, den Atomkräften keine Technologieoption zur Verfügung zu stellen, welche letztere dann für nichtfriedliche Zwecke weiterverwenden könnten. Zweitens verpflichtet das ITER-Abkommen alle Mitglieder zur ausschließlich friedlichen Nutzung der Kernfusion. Diese Norm gilt es zu präzisieren und festzuschreiben, dass sich die friedliche Nutzung nicht nur auf den International Thermonuclear Reactor (ITER) im französischen Cadarache beschränkt. Auch für all jene Fusionsreaktoren, welche im Nachgang an ITER von den Mitgliedsstaaten entwickelt werden und die in den nächsten Jahrzehnten in China, Indien, Japan, Russland,

Südkorea, den Vereinigten Staaten oder der EU in Betrieb gehen könnten, sollte die ausschließlich friedliche Nutzung gefordert werden.

Diese Forderung läuft auf eine praktische und einer politische Herausforderung hinaus: Praktisch heißt das, die Integration von Safeguards für die Kernfusion voranzutreiben und entsprechende Forschungsaufgaben anzugehen. Politisch bedeutet diese Forderung, den Atommächten die Notwendigkeit dieser Safeguards für alle Fusionsanlagen naheulegen, unabhängig davon, ob die Anlage auf dem Territorium eines Kernwaffenstaates oder eines Nichtkernwaffenstaates liegt.

.

Inhalt

1.	Einleitung	1
2.	Die Zukunftstechnologie Kernfusion	2
2.1	Technologieentwicklung im Kalten Krieg	2
2.2	Technologieentwicklung nach dem Kalten Krieg	3
2.3	Spaltmaterialproduktion im Fusionsreaktor	4
3.	Nicht-friedliche Nutzung der Kernfusion	2
3.1	Problemdimension	2
3.2	Perspektiven der Kernfusion im 21. Jahrhundert	6
3.3	Proliferationsrisiken der Kernfusion	7
3.4	Denkbare Szenarien der militärischen Nutzung des Fusionsreaktors	9
4.	Regulierungs- und Gestaltungsoptionen für eine friedliche Nutzung der Kernfusion	11
4.1	Safeguards und Fusionsreaktoren: der Ist-Zustand	13
4.2	Safeguards für Fusionsreaktoren: wo ansetzen?	14
5.	Erste Schritte auf dem Weg zur friedlichen Kernfusion	16
6.	Appendix	18
6.1	Fusions- und Spaltreaktortypen	18
6.2	Proliferationsresistenz	20
6.3	Ein Beispiel für einen Fusionsreaktor – Das Modell PPCS-A	20
6.4	Tritiumabzweigung	22
6.5	Spaltmaterialproduktion	23
6.6	Verdeckte Operation	24
6.7	Safeguards und Fusionsreaktoren	25
7.	Literaturverzeichnis	26
8.	Abkürzungsverzeichnis	28

1. Einleitung

Anfang November 2013 veröffentlichten vier renommierte Klimaforscher einen Appell an die Öffentlichkeit, in dem sie den massiven Ausbau der Kernenergie für das 21. Jahrhundert forderten (Caldeira et al. 3.11.2013). Appelle dieser Art aus der Umwelt- und Klimaforschung sind heute keine Seltenheit mehr, stoßen aber gleichzeitig auf eine weitverbreitete Skepsis gegenüber der Atomenergie, insbesondere innerhalb westlicher Zivilgesellschaften. Die Vorbehalte gegenüber der Kernenergie sind allgemein bekannt: Reaktorsicherheit und „Restrisiko“, kaum tragbare Endlagererfordernisse für den radioaktiven Abfall und nukleare Weiterverbreitung (Proliferation) sind die häufigsten Schlagworte, die auf viele nach wie vor ungelöste Probleme des Nuklearzeitalters verweisen.

Im Windschatten dieser globalen Atomdebatte wächst im 21. Jahrhundert mit der Kernfusion eine neue nukleare Zukunftstechnologie heran, welche die Eckpunkte dieser Diskussion empfindlich verschieben könnte. Denn die Kernfusion scheint auf den ersten Blick die drei wichtigsten Einwände gegenüber der herkömmlichen (auf Kernspaltung basierenden) Kernenergie abzumildern: Störfälle im Fusionsreaktor wären räumlich und zeitlich beschränkt und würden keine langfristigen und weitreichenden Evakuierungsmaßnahmen verlangen wie etwa die Reaktorunfälle in Tschernobyl oder Fukushima; das im Fusionsreaktor enthaltene radioaktive Inventar wäre viel kleiner und hätte eine andere Zusammensetzung als der radioaktive Abfall aus dem Spaltreaktor, was wesentlich einfachere Endlagererfordernisse zur Folge hätte (das radioaktive Inventar eines Fusionskraftwerk müsste etwa ein Jahrhundert lang sicher gelagert werden und nicht – wie im bisherigen Fall – mehrere Jahrtausende lang). Und schließlich verwenden Fusionsreaktoren typischerweise kein nukleares Material (*nuclear material*), welches für den Bau von Kernwaffen gebraucht wird. Zwar erwähnen einige Autoren ein prinzipielles Dual-Use Risiko der Kernfusion (Holdren et al. 1989, Raeder 1995), die Missbrauchsgefahr wird jedoch von Experten der Fusionsforschung meist als marginal angesehen (Technikfolgenabschätzungen dieser Art finden sich etwa in Cook et al. 2001 und Maisonnier et al. 2005).

Dieser Report wirft einen kritischen Blick auf die letzte Aussage und hinterfragt die These einer prinzipiell friedlichen Kernfusion. Er weist nach, dass mit der Verfügbarkeit kommerzieller Fusionstechnik verschiedene militärische Optionen im Bereich der Nuklearbewaffnung denkbar werden: Diese betreffen sowohl die etablierten Atommächte (vertikale Proliferation) als auch die nuklearwaffenfreie Staatenmehrheit (horizontale Proliferation).¹ Gleichzeitig greifen hinsichtlich der Kernfusion existierende Regularien nationaler und internationaler Gesetzgebung so gut wie gar nicht; denn weder Exportkontrollen noch nukleare Sicherheitsmaßnahmen (Safeguards) sind heute auf die Zukunftstechnologie Kernfusion angepasst.

Der vorliegende Report plädiert daher für eine frühzeitige Weichenstellung der Entscheidungsträger, heute schon Maßnahmen zu ergreifen, um die weitere Entwicklung

1 Eine ausführliche und theoriegeleitete Diskussion möglicher Szenarien findet sich in Franceschini et al. 2013.

der Kernfusion mit gezielten Nichtverbreitungsmaßnahmen zu flankieren. Denn die ernüchternden Erfahrungen vergangener nuklearer Technologiediffusion mahnen bezüglich der zukünftigen Kommerzialisierung und Weiterverbreitung der Fusionstechnologie zu einer gewissen Vorsicht.²

Gleichzeitig sind die Perspektiven präventiver und prospektiver Technikgestaltung für die Kernfusion günstig, da sich diese Zukunftstechnologie in den nächsten Jahren in einer kritischen Übergangsphase von der Grundlagenforschung zur angewandten Forschung befinden wird. Vor dem möglichen kommerziellen Durchbruch der Kernfusion sollten deshalb grundlegende regulatorische und technische Maßnahmen etabliert werden, welche diese Zukunftstechnologie auf die richtige (friedenspolitische) Schiene setzen. Soll die Kernfusion – wie von ihren Befürwortern gewünscht – einen bedeutenden Beitrag für eine nachhaltige, sichere und klimaschonende Energieversorgung des 21. Jahrhunderts liefern, sind diese Maßnahmen unerlässlich.

2. Die Zukunftstechnologie Kernfusion

2.1 Technologieentwicklung im Kalten Krieg

Erste Einsichten in die Prinzipien der Kernfusion sind schon seit Beginn des 20. Jahrhunderts bekannt und verdanken sich im Wesentlichen dem Zusammenspiel der damals bereits etablierten Astrophysik mit der entstehenden Disziplin der Kernphysik. Astro- und kernphysikalische Forschungsarbeiten wiesen dabei nach, dass die Licht- und Wärmeproduktion der Sonne (und anderer Sterne) auf die Verschmelzung (Fusion) von „leichten“ Atomkernen zurückzuführen sei. Dieses „Sonnenfeuer“ auf der Erde zu reproduzieren und langfristig zur Energieproduktion zu nutzen war seit 1940 das Ziel einer sich ausweitenden internationalen Fusionsforschung. Die Erforschung der Kernfusion ging jedoch insgesamt schleppend voran, und die erhoffte Entwicklung eines Kernfusionsreaktors kam aufgrund technischer Schwierigkeiten, aber auch aufgrund des Vorranges der hoch subventionierten Grundlagen- und Anwendungsforschung der Kernspaltung nicht richtig voran. So konnten schon in den 1950er Jahren weltweit die ersten stromproduzierenden „Spaltreaktoren“ ans Netz gehen, während der „Fusionsreaktor“ bis zum heutigen Tag noch weitgehend eine vielversprechende Zukunftsoption geblieben ist.

Einzig in der militärischen Nutzung gelang der Fusionsforschung ein bedeutender Durchbruch, als 1952 die erste amerikanische „Wasserstoffbombe“ getestet wurde, bei der in einer Primärdetonation schwere Atomkerne gespalten und mit Hilfe der damit freigesetzten Energie in einer unmittelbar darauffolgenden Sekundärdetonation (leichte) Wasserstoffisotope verschmolzen („fusioniert“) wurden und zusätzlich Energie freisetzen. Der Sekundärteil der Wasserstoffbombe sorgte dabei für die bis dahin unerreichten

2 Zahlreiche zivile Nuklearkooperationen der Vergangenheit mündeten – teilweise trotz Safeguards – in einem Kernwaffenprogramm. Für eine Diskussion dieser Dual-Use Problematiken und ihrer schwierigen Kontrolle siehe Fuhrmann 2009; Sokolski 2008.

extremen Detonationswerte im Megatonnenbereich und gab dem atomaren Rüstungswettlauf zwischen den Vereinigten Staaten und der Sowjetunion eine neue Qualität.³

Die Bedeutung der Kernfusion für die militärischen Programme der Atomkräfte (und die damit verbundene Geheimhaltung großer Teile der Forschungsergebnisse) sowie der Vorrang der Spalttechnologien im zivilen Bereich verhinderten für lange Zeit die Weiterentwicklung der Fusion als potentielle Energiequelle der Zukunft (Meade 2010).

2.2 Technologieentwicklung nach dem Kalten Krieg

Erst im auslaufenden Kalten Krieg war es möglich, einen neuen internationalen Anlauf zur Entwicklung eines Fusionsreaktors zu starten, in dem die Kenntnisse der Vereinigten Staaten, der Sowjetunion und der Europäer im Bereich der Fusionsforschung zueinander finden sollten. Was Ronald Reagan und Michail Gorbatschow im Jahre 1985 am Rande eines Gipfeltreffens der Superkräfte in Genf auf den Weg gebracht haben, sollte sich in den darauffolgenden Jahren zu einem der größten internationalen Forschungsprojekte weiterentwickeln und bindet heute im sogenannten ITER-Projekt die Europäische Union, die Vereinigten Staaten, Russland, Japan, Südkorea, China und Indien in ein gigantisches Forschungskonsortium (Ikeda 2010).

Das Ziel des ITER-Joint Ventures ist vorerst die prinzipielle Machbarkeit eines Fusionskraftwerkes zu beweisen. Die spezifische Herausforderung dieses milliarden-schweren Großprojekts besteht darin, im International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) zehnmals mehr Energie zu produzieren (500 MW) als für den Betrieb des Reaktors benötigt wird (50 MW). Obwohl ITER diese Leistungsverstärkung nur für wenige Minuten aufrechterhalten wird, gilt es unter Experten als ausgemacht, dass das Experiment, so es gelingt, die technische Realisierbarkeit kontrollierter Kernfusion demonstriert. Der ITER-Reaktor wird zurzeit im französischen Cadarache errichtet, soll 2019 in Betrieb genommen werden und ab 2027 mit den Brennstoffen Deuterium (D) und Tritium (T) versorgt werden (und dabei im laufenden Betrieb auch einen Teil des Tritiums selbst produzieren; für Details siehe Appendix).⁴

Als nächsten Schritt wird im ITER-Kontext bereits über die nächste Generation von Forschungsreaktoren nachgedacht, an denen weitere materialwissenschaftliche Untersuchungen und andere Optimierungen durchgeführt werden sollen. Es ist noch nicht entschieden, wie viele dieser leistungsstärkeren Demonstrationsreaktoren (DEMO) entstehen sollen, aber es ist geplant, dass in den 2030er Jahren eine gewisse Zahl dieser Fusionsreaktoren in einigen ITER-Mitgliedsländern in Betrieb gehen sollen. Da im ITER-Konsortium Atomkräfte und Nichtkernwaffenstaaten kooperieren, ist es nicht ausge-

3 Moskaus Antwort ließ auch nicht lange auf sich warten und erfolgte mit dem ersten sowjetischen Test einer Wasserstoffbombe im August 1953.

4 Alle Jahreszahlen stammen von der ITER-Webseite (www.iter.org) aus dem Jahr 2013 und sollten als momentane Schätzungen gelesen werden.

schlossen, dass ab 2030 diese DEMO-Reaktoren auch in Nichtkernwaffenländern (etwa in der EU, in Japan oder in Südkorea) in Betrieb gehen könnten.

Ab Mitte des 21. Jahrhunderts erwartet man schließlich den kommerziellen Fusionsreaktor, der, abhängig von den technischen, wirtschaftlichen und energiepolitischen Randbedingungen, eine mehr oder weniger starke globale Verbreitung finden könnte.

Alle hier besprochenen Reaktorkonzepte – ITER, DEMO und die daraus folgenden kommerziellen Leistungsreaktoren – basieren auf denselben Prinzipien: Erstens erfolgt die Kernfusion durch ein Magneteinschlussverfahren in einem sogenannten Tokamak (für Details siehe Appendix) und zweitens werden im Reaktor zwei spezifische Wasserstoffisotope verschmolzen: der schwere Wasserstoff Deuterium (D) und der superschwere Wasserstoff Tritium (T).⁵ Letzteres Isotop ist unter Nichtverbreitungsaspekten problematisch, da man durch die Beigabe weniger Gramm Tritium den Detonationswert einer Kernwaffe empfindlich steigern kann („boosting“) und der superschwere Wasserstoff gleichzeitig nicht zu den von der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) routinemäßig überprüften Materialien gehört.⁶

2.3 Spaltmaterialproduktion im Fusionsreaktor

In diesem Report liegt das Augenmerk jedoch auf einem anderen Nichtverbreitungsaspekt des Fusionsreaktors, nämlich das Potential dieser Reaktoren im laufenden Betrieb waffenfähiges Spaltmaterial produzieren zu können. Technische Details dazu finden sich im Appendix dieses Reports sowie in Englert/Liebert 2010.

Man beachte, dass die Spaltmaterialproduktion in einem Fusionsreaktor eine Anomalie darstellt. Denn die Produktion von Spaltmaterial (genauer: von speziellem spaltbarem Material) setzt den Einsatz von sogenanntem fertilen nuklearen Ausgangsmaterial im Fusionsreaktor voraus, und dieser Materialeinsatz ist bei „reinen“ Fusionsreaktoren nicht vorgesehen.⁷

Reine Fusionsreaktoren sind lediglich dazu ausgelegt, aus der Fusion leichter Kerne Strom zu erzeugen und kommen somit im Prinzip gänzlich ohne Nuklearmaterial aus. Da sie nicht für die Produktion von Spaltmaterial ausgelegt sind, müssten sie, um letzteres zu erzeugen, zuerst geeignet umgerüstet werden, um dann jenseits der Parameter ihres Normalbetriebs zu laufen. Dies wirft zusätzliche Fragen der Reaktorsicherheit und der

5 Neben der hier besprochenen D-T-Fusion sind auch andere Fusionsreaktionen denkbar, etwa D-D, H-³He oder p-¹¹B.

6 Die IAEO (engl. International Atomic Energy Agency, IAEA) wird in der Fachliteratur oft lediglich als die „Agency“ bezeichnet. Dieser Report schließt sich dieser sprachlichen Konvention an.

7 Dieser Report benutzt für Nuklearmaterialien (nuclear material) die Sprachregelungen der IAEO und bezeichnet abgereichertes Uran, Natur-Uran und Thorium als (fertile) Ausgangsmaterialien (source materials) und ²³⁹Pu, ²³³U und hochangereichertes Uran als spezielle spaltbare Materialien (special fissionable materials). Letztere sind unmittelbar waffenfähig. Für Details siehe Art. XX des IAEO-Statuts. Das Statut findet sich etwa im Anhang von Fischer 1997.

Reaktorleistung auf und erklärt, warum die „klassische“ Fusionsforschung diesem umständlichen Szenario bisher wenig Beachtung geschenkt hat.

3. Nicht-friedliche Nutzung der Kernfusion

3.1 Problemdimension

Aus den vorherigen Überlegungen ergeben sich die Möglichkeiten einer nicht-friedlichen Nutzung eines D-T-Fusionsreaktors wie folgt: Der Reaktor liefert erstens im Normalbetrieb laufend Tritium, welches bereits in Grammengen zu bedeutenden Leistungsverstärkungen bei Kernwaffen führen kann; und zweitens kann der Reaktor bei geeigneter Umrüstung (Beimengung von nuklearem Ausgangsmaterial in die sogenannten Reaktorblankets) das Primärmaterial einer Kernwaffe produzieren, nämlich spaltbares waffenfähiges Material, wie etwa Plutonium.⁸

Beide Szenarien – die Tritiumabzweigung für Waffenzwecke und die Produktion von spaltbarem Material – sind für ITER praktisch ausgeschlossen, da im Projekt multinationale Forscherteams arbeiten und die Produktion von Spaltmaterial in den Reaktorbrutblankets nicht vorgesehen ist. Für die DEMO-Reaktoren und die darauf folgenden Leistungsreaktoren können allerdings Szenarien der Tritiumabzweigung und der Spaltmaterialproduktion nicht gänzlich ausgeschlossen werden, da erstens einige dieser Reaktoren in Kernwaffenstaaten in Betrieb gehen könnten (wo Waffentritium aufgrund des radioaktiven Zerfalls dieses instabilen Isotops ständig nachproduziert werden muss) und zweitens in einigen dieser Staaten ein explizites Interesse an sogenannten Hybridanlagen zu bestehen scheint. In Spalt-Fusions-Hybridreaktoren ist der Einsatz von nuklearem Ausgangsmaterial aber gewollt, um im laufenden Betrieb spaltbares Material mit zu produzieren. Dieses Spaltmaterial kann zwar prinzipiell in zivilen Anwendungen Verwendung finden (Brennstoff für Spaltreaktoren), es eignet sich aber auch für nicht-friedliche Zwecke wie etwa der Kernwaffenproduktion.

Wer sich nun der Frage der Nichtverbreitungsdimension zukünftiger Fusionsreaktoren nähert, wird häufig mit dem Einwand konfrontiert, das Risiko einer nicht-friedlichen Nutzung dieser Technologie sei vernachlässigbar. Schon heute gäbe es weitaus weniger anspruchsvolle Technologien, welche sich bereits in verschiedenen Kernwaffenprogrammen bewährt hätten, etwa die Plutoniumproduktion in Spaltreaktoren verschiedener Auslegung oder die Urananreicherung über Gasultrazentrifugen. Dieser Einwand ist unter den heutigen Umständen zutreffend, vernachlässigt aber die Tatsache, dass ein Staat dennoch im Windschatten der Kernfusion eine Dual-Use-Strategie verfolgen könnte, auch

⁸ Dieser Report diskutiert nur die Plutoniumproduktion, die sich aus der Beimengung von Natur-Uran in die Blankets ergibt. Eine analoge Nichtverbreitungs-Herausforderung ergäbe sich, wenn man den Blankets Thorium beimengt; denn unter Neutronenbeschuss transmutiert dieses Element über Zeit zum Uran-Isotop ²³³U, welches ebenso wie Plutonium waffenfähig ist. Für Details hierzu siehe Glaser/Goldston 2012.

wenn er die Technologie nicht vollständig beherrscht (wie es etwa der Iran mit seinem Anreicherungs- und Schwerwasserprogrammen getan hat). Der Einwand vernachlässigt aber vor allem die technologische Dynamik und könnte unter veränderten energiepolitischen und technologischen Randbedingungen an Gewicht verlieren, insbesondere wenn die Kernfusion sich als globale Energiequelle etabliert und sich kommerzielle Fusionsreaktoren in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts stark verbreiten sollten.

3.2 Perspektiven der Kernfusion im 21. Jahrhundert

Die Dachorganisation der europäischen Fusionsforschung EFDA (European Fusion Development Agreement) schätzt in diesem Kontext, dass die Kernfusion bis zum Ende dieses Jahrhunderts bis zu dreißig Prozent des globalen Strombedarfs decken könnte (EFDA 2012). Dieses kühne Szenario entspräche dem Betrieb von tausenden von Fusionskraftwerken mit einer (elektrischen) Gesamtleistung mehrerer Terawatt.⁹ Wie realistisch diese Vorhersagen sind, lässt sich aus heutiger Perspektive kaum bewerten, doch kann man davon ausgehen, dass die Behauptung von weiten Teilen der (atomskeptischen) Energiepolitik nicht geteilt würde, welche von einem tendenziellen Niedergang der gesamten Kernenergie (Kernspaltung und -fusion) im 21. Jahrhundert ausgeht (Schneider/Froggatt 2013).

Die EFDA-Prognosen folgen hingegen dem Trend einiger gegenläufiger Energiemodelle für das 21. Jahrhundert, die einen drastischen Anstieg der Kernenergie („nukleare Renaissance“) von gegenwärtig 370 GW(e) auf etwa das Zehnfache bis zum Ende des Jahrhunderts unter der Berücksichtigung spezifischer klimapolitischer und ökonomischer Randbedingungen prognostizieren (siehe exemplarisch hierfür die Metastudie des Energy Modeling Forums EMF-22, Clarke et al. 2009).¹⁰

Akzeptiert man die Hypothese der Verzehnfachung der Kernenergie bis zum Jahrhundertende (womit man im Jahre 2100 etwa ein Drittel des globalen Strombedarfs decken könnte), so würde sich die Zahl der Kernkraftwerke von gegenwärtig 430 auf etwa das Zehnfache erhöhen. Für dieses Szenario ist es allerdings mehr als fraglich, ob die zur Verfügung stehenden globalen Uranreserven hinreichende Deckung für eine entsprechende Zahl von Spaltreaktoren liefern könnten (OECD 2012). Theoretisch wäre es aber möglich, einerseits durch den Einsatz von Fusionsreaktoren die Urannachfrage zu verringern und andererseits mit Schnellen Brutreaktoren (und eventuell mit Hybrid-Fusionsreaktoren) zusätzlichen spaltbaren Brennstoff zu erzeugen (Goldston 2011). Kann die Fusion hier mit konventionellen Spalttechnologien konkurrieren, könnte sie also langfristig einen Teil des Atomstroms liefern. In einem solchen Szenario der nuklearen Renaissance erscheint zu-

9 Ein Terawatt entspricht tausend Gigawatt (GW). Die typische elektrische Leistung eines Kernkraftwerks entspricht etwa einem GW(e), das entspricht grob einem Drittel der thermischen Kraftwerksleistung.

10 Die Metastudie wertet zahlreiche Energieprognosen aus, welche einen begrenzten Temperaturanstieg zur Folge hätten und gleichzeitig innerhalb gewisser finanzieller Grenzwerte realisierbar scheinen. Sie kommt zum Schluss, dass ein „bezahlbares“ und „klimaschonendes“ Energieangebot im Jahre 2100 aus etwa einem Drittel erneuerbarer Energien, einem Drittel CO₂-Sequestrierung und einem Drittel Kernenergie bestehen sollte.

mindest eine dreistellige Anzahl an Fusionskraftwerken am Ende dieses Jahrhunderts nicht unrealistisch, während das Gros des Atomstroms nach wie vor aus tausenden von Spaltreaktoren käme. Aber gänzlich ausschließen lässt sich die oben erwähnte EFDA-Prognose nicht: Die Fusion könnte im Prinzip auch den Löwenanteil einer nuklearen Renaissance für sich ausmachen und zum Ende des Jahrhunderts vierstellige Reaktorzahlen aufweisen.

3.3 Proliferationsrisiken der Kernfusion

Wenn die ökonomischen und technischen Hürden des Fusionsreaktors handhabbar werden sollten, könnten ab Mitte des 21. Jahrhunderts kommerzielle Spalt- und Fusions-technologien koexistieren. Spätestens zu diesem Zeitpunkt werden dann einige Kennzahlen des Proliferationspotentials der Kernfusion stärker in den Vordergrund rücken und nahelegen, dass dieses Potential den herkömmlichen Technologien der Spaltmaterialproduktion mindestens ebenbürtig ist. Vier Beobachtungen stützen diese These:¹¹

Erstens haben Simulationen kommerzieller Fusionsreaktoren gezeigt, dass sich mittels dieser Anlagen etliche signifikante Mengen Plutonium pro Jahr erzeugen lassen, die theoretisch zur Kernwaffenproduktion genutzt werden könnten.¹² Die maximale Produktionskapazität eines typischen Leistungsreaktors der ersten Generation wurde dabei auf einige hundert Kilogramm Plutonium pro Jahr errechnet.¹³ Vor dem Hintergrund, dass die gegenwärtigen Produktionsprogramme für Waffenplutonium in Indien, Pakistan und Nordkorea jährlich keine 30 Kilogramm erreichen, zeigen sich in diesen Zahlen bereits die quantitativen Dimensionen des Proliferationspotentials eines Fusionsleistungsreaktors.¹⁴ Durch eine geeignete Umrüstung eines solchen Reaktors könnten die obengenannten Länder ihre Plutoniumproduktion gegenüber heute um mindestens eine Größenordnung erhöhen.

Zweitens hat eine Berechnung der Isotopenzusammensetzung des im Fusionsreaktor erbrüteten Plutoniums gezeigt, dass es ideal für Waffenzwecke geeignet ist. Und dies gilt fast unabhängig von der Produktionszeit im Fusionsreaktor, was einen doppelten (quantitativ-qualitativen) Vorteil für ein militärisches Programm mit sich bringt: Je länger man das beigemengte Uran im Fusionsreaktor belässt, desto mehr Waffenplutonium entsteht; und gleichzeitig bleibt trotz fortwährender Neutronenbestrahlung das Plutonium auch nach

11 Eine ausführliche technisch fundierte Diskussion der hier vorgestellten Ergebnisse findet sich in Englert 2010; Englert/Liebert 2010 und Englert et al. 2011.

12 Die IAEO nennt 8 kg Plutonium (Pu) eine signifikante Menge „for which the possibility of manufacturing a nuclear explosive device cannot be excluded“. Technologisch fortgeschrittene Staaten mit Erfahrung im Waffenbau können jedoch schon mit wenigen Kilogramm Pu eine Kernwaffe bauen.

13 Diese Zahlen können als konservative Schätzung gelten und wurden für Leistungsreaktoren errechnet, die *nicht* auf Spaltmaterialproduktion hin optimiert sind und dementsprechend nur begrenzt Ausgangsmaterial in Spaltmaterial umwandeln können. Für technische Details siehe Englert 2010.

14 Indien, Pakistan und Nordkorea sind zurzeit die einzigen Atommächte, in denen die Produktion von Spaltmaterial für Waffenzwecke vorangetrieben wird. Die entsprechende indische Pu-Produktion wird dabei auf 16-26 kg pro Jahr geschätzt, die pakistanische auf jährliche 12-24 kg, die nordkoreanische auf wenige Kilogramm pro Jahr. Für genaue Zahlen siehe International Panel on Fissile Materials 2013.

mehreren Reaktorjahren noch waffenfähig. Bei der umständlichen Waffenplutoniumgewinnung in Spaltreaktoren sind dagegen nur kurze Bestrahlungszeiten erlaubt, da die Qualität des Plutoniums für Waffenzwecke mit der Zeit abnimmt.

Drittens ist der für die Plutoniumproduktion benötigte Uranbedarf signifikant kleiner als bei einem herkömmlichen Spaltreaktor.¹⁵ Dies hat zur Folge, dass Länder mit Uranknappheit (z.B. Indien) über den Umweg eines Fusionsreaktors ihre Plutoniumproduktivität erhöhen könnten. Simulationsrechnungen haben gezeigt, dass für eine gegebene Masse an Uran Fusionsreaktoren leicht doppelt so hohe Plutoniummengen erzeugen können wie etwa herkömmliche kommerzielle Spaltreaktoren.

Und viertens geben Fusionsreaktoren Kernwaffenstaaten und Kernwaffenanwärtern fast unbegrenzte Zugriffsmöglichkeiten auf das knappe Wasserstoffisotop Tritium. Ein kommerzielles Fusionskraftwerk wird stets mehrere Kilogramm Tritium in seinem Inventar aufweisen, es wird täglich mehrere hundert Gramm T „verbrennen“ und gleichzeitig eine etwas größere Menge nachproduzieren. Abzweigungen im Grammbereich würden weder durch eine Materialbilanz erfasst werden können, noch die Leistungsfähigkeit des Reaktors beeinträchtigen, da Fusionsreaktoren grundsätzlich auf eine leichte „Tritium-Überproduktion“ ausgelegt sind, um Verluste durch radioaktiven Zerfall oder Diffusion dieses flüchtigen Isotops auszugleichen. Aber Grammmengen von Tritium sind militärisch bedeutsam, da sie zur Kernwaffenverstärkung eingesetzt werden können. Durch die Tritiumverstärkung lässt sich nebenbei auch die sogenannte Frühzündungsproblematik („fizzle“) bei qualitativ minderwertigem Plutonium abmildern, was einem Kernwaffenstaat mit solchen Plutoniumressourcen (etwa aus seinen Reaktorplutoniumreserven) neue militärische Optionen eröffnet. Grammmengen von Tritium eröffnen auch die Möglichkeit, die Spaltmaterialmenge einer Kernwaffe bei gleichbleibendem Detonationswert deutlich zu verringern (im Kilogrammbereich). Dadurch verringert sich die Gesamtmasse der Kernwaffe und eröffnet die Möglichkeit, das Gesamtdesign zu miniaturisieren, so dass sie auf einer Rakete eingesetzt werden kann bzw. als Primärzünder in einer thermonuklearen Waffe (für eine ausführliche Diskussion der sicherheitspolitischen Tritiumproblematik siehe Kalinowski 2004, für quantitative Abschätzungen den Appendix dieses Reports sowie Englert/Liebert 2010).

Die Nichtverbreitungsherausforderung der Kernfusion ergibt sich somit aus der Gesamtschau dieser Beobachtungen: Ein kommerzieller Fusionsreaktor eröffnet prinzipiell die Möglichkeit, in kürzester Zeit ein modernes Kernwaffenarsenal aus 100-300 geboosteten Plutoniumwaffen aufzubauen.¹⁶ Ein einziges Reaktorjahr (und ein einzelner Reaktor)

15 In einem herkömmlichen Spaltreaktor wird Uran als Brennstoff benötigt. Um einen Spaltreaktor überhaupt in Betrieb zu nehmen, sind mindestens 10 Tonnen (t) Uran notwendig. Dementsprechend befinden sich in einem kommerziellen Leistungsreaktor typischerweise bis zu 100 t Uran. Selbst in einem kleinen Spaltreaktor zur Produktion von 5-10 kg Waffenplutonium pro Jahr sind allein schon etwa 50 t Uran für den Betrieb nötig. In einem Fusionsreaktor sind für eine ähnliche Produktionsrate schon 500 kg ausreichend. Hinzu kommt, dass in einem Fusionsreaktor bei geeigneter Konfigurierung die Umwandlungsrate von Uran zu Plutonium höher ist als im Spaltreaktor.

16 Dies entspricht in etwa der Arsenalgröße der nuklearen Mittelmächte China, Frankreich oder Großbritannien.

würden dabei im Prinzip ausreichen, um die dafür notwendigen Plutonium- und Tritiummengen zu produzieren, und der Uraneinsatz wäre geringer als bei vergleichbaren Plutoniumprogrammen der Gegenwart. Daneben erlaubt die Plutonium-Tritium-Kombination einem Kernwaffenanwärter, sofort kompaktere Waffendesigns ins Auge zu fassen („geboostete“ Spaltwaffen), die viel besser für die Sprengkopffentwicklung von Raketen mit großer Reichweite optimiert sind.

3.4 Denkbare Szenarien der militärischen Nutzung des Fusionsreaktors

Die obigen Überlegungen zeigen die Risikodimension der Kernfusion auf, welche unabhängig von der weltpolitischen Gesamtlage, bestehen. Diese Risiken können durch weltpolitische Trends verstärkt oder abgemildert werden, etwa der Dynamik des Machtübergangs oder der Verschiebung fundamentaler Normen der nuklearen Ordnung (Nichtverbreitung, Abrüstung, Recht auf friedliche Nutzung der Kernenergie). Dieser Umstand ist insbesondere von Bedeutung, da im ITER-Projekt traditionelle und aufstrebende Großmächte kooperieren, welche sich auch deutlich in ihren nuklearen Ordnungsvorstellungen unterscheiden.¹⁷ Vor diesem Hintergrund und unter der Voraussetzung einer grundsätzlichen Handhabbarkeit kommerzieller Fusionstechnologien sind damit insbesondere für die zweite Hälfte der 21. Jahrhunderts verschiedene Szenarien vertikaler und horizontaler Proliferation denkbar.

Im Bereich vertikaler Proliferation (der Weiterentwicklung bereits existierender Nukleararsenale) ist zunächst die Option der Tritiumabzweigung naheliegend, da alle existierenden Atommächte über geringe Tritiumvorräte verfügen und die Vorräte nebenbei durch radioaktiven Zerfall um jährlich etwa fünf Prozent schrumpfen. Unabhängige Experten gehen auch davon aus, dass China, Frankreich, Großbritannien, Indien, Israel, Pakistan, Russland und die Vereinigten Staaten Tritium in ihren Kernwaffen zur Detonationsverstärkung nutzen, während es im Falle Nordkoreas zumindest Spekulationen gibt, ob Pjöngjang nicht ebenfalls eine langfristige Tritium-basierte Boostingoption verfolgt (Lewis 2010). Die Tritiumnachfrage der existierenden Kernwaffenbesitzer scheint demnach auf absehbare Zeit ungebrochen.

Anders sieht es bei der Nachfrage nach spaltbarem Material für Waffenzwecke aus: Hier profitieren einige etablierte Nuklearmächte (insbesondere die USA und Russland) von ihrer Überproduktion aus der Zeit des Kalten Krieges und können sogar überschüssiges Material eliminieren. Andere Länder wie Frankreich, Großbritannien und China haben immerhin ein Produktionsmoratorium deklariert, welches allerdings nicht überprüft wird. Über Israel ist wenig bekannt, während Indien, Pakistan und Nordkorea ihre Spaltmaterialbestände langsam, aber kontinuierlich ausweiten (für die aktuellsten Zahlen siehe International Panel on Fissile Materials 2013). Es ist schwer abzuschätzen, wie sich diese Spaltmaterialnachfrage

¹⁷ Hier sticht insbesondere Indien heraus, das seine Vorbehalte gegenüber den Normen der herrschenden Nuklearordnung seit Jahrzehnten deutlich macht. Für eine ausführliche Diskussion indischer Nuklearpolitik siehe Rauch 2013.

über die nächsten Jahrzehnte verändern wird, aber geopolitische Dynamiken des globalen Machtübergangs könnten möglicherweise bedeutenden Einfluss auf diese Nachfrage nehmen. So fällt auf, dass die gegenwärtigen indischen und chinesischen Spaltmaterial- und Kernwaffenbestände im Prozentbereich der amerikanischen und russischen Bestände liegen und sich Beijing und Delhi gleichzeitig in einem rasanten ökonomischen und militärischen Aufholprozess gegenüber den ehemaligen Supermächten befinden, der sie bis zur Mitte des Jahrhunderts an die Spitze des internationalen Systems katapultieren könnte (Kwasnicki 2011). Beide Länder könnten in den nächsten Jahrzehnten DEMO-Reaktoren betreiben (möglicherweise auch im Hybridbetrieb), und für beide Länder können Spaltmaterialproduktionen für Waffenzwecke nicht ausgeschlossen werden, wenn sich die Schere zwischen den ehemaligen Supermächten des Kalten Krieges und den aufsteigenden asiatischen Giganten nicht durch Abrüstung oder Vernichtung spaltbaren Materials weiter schließt. Dies gilt umso mehr, wenn in China und Indien kommerzielle Fusionskraftwerke in großer Zahl verfügbar würden.

Die Dynamik des globalen Machtübergangs kann sich aber auch in Szenarien horizontaler Proliferation (das Aufkommen neuer Nuklearmächte) niederschlagen. Hier stehen mit Japan und Südkorea zwei fortgeschrittene Kernenergieländer prototypisch im Fokus, die als ITER-Gründungsmitglieder zu den Pionieren kommerzieller Kernfusion gehören und deren geostrategische Sicherheitsdilemmata mit dem Aufstieg Chinas, den fortwährenden Provokationen Nordkoreas und dem schleichenden Vertrauensverlust gegenüber den amerikanischen Sicherheitsgarantien (einschließlich Washingtons Nuklearschirm) sich möglicherweise weiter verschärfen könnten. Japan und Südkorea könnten in den nächsten Jahrzehnten Standorte für DEMO-Anlagen sein, und – so es eine kommerzielle Kernfusion geben wird – sehr wahrscheinlich auch für die ersten Leistungsreaktoren.¹⁸ Dieser Umstand würde beide Länder in die Lage versetzen, über ihre Fusionsanlagen auf die Ausgangsmaterialien geboosterter Plutoniumwaffen (Pu + T) zugreifen zu können, und dies in kürzester Zeit, da Tokio bereits über eine industrielle Plutoniumseparationsfähigkeit verfügt (Wiederaufarbeitungsanlage in Rokkasho) und Seoul am Aufbau einer solchen Fähigkeit arbeitet.

Grundsätzlich werten aber Expert/innen die (horizontalen) Proliferationsgefahren der Kernfusion für die meisten Staaten als relativ gering.¹⁹ Dies wird zum einen damit begründet, dass diese Zukunftstechnologie für einen Großteil der Staatenwelt noch über Jahrzehnte zu anspruchsvoll sein wird und dass demnach nur wenige Staaten außerhalb des ITER-Konsortiums in der Lage sein werden, die technischen und finanziellen Möglich-

18 Japan war ursprünglich als Standort für ITER angedacht. Einige Beobachter führen die Entscheidung, das Projekt im Kernwaffenstaat Frankreich anzusiedeln, auf die Proliferationsrisiken zurück, die eine Anlage dieser Größenordnung für das sensitive Sicherheitsumfeld Japans bedeutet hätte (Gspöner/Hurni 2008).

19 Die Autoren dieses Reports führten im Jahr 2011 eine kleine Expertenbefragung durch und verschickten zu diesem Zweck 140 Fragebögen an internationale Experten der Kernfusion und der Nichtverbreitungsthematik. Der Rücklauf dieser sogenannten „Delphi-Studie“ betrug 24 Fragebögen. Details zur Delphi-Umfrage finden sich auf der Webseite der Interdisziplinären Arbeitsgruppe Naturwissenschaft, Technik und Sicherheit (IANUS) der TU Darmstadt unter www.ianus.tu-darmstadt.de/fusion (13.1.2014).

keiten aufzubringen, um an der kommerziellen Nutzung der Fusionsenergie teilzuhaben.²⁰ Zum anderen argumentieren die Experten, dass die Proliferationsrisiken mit den herkömmlichen Nukleartechnologien verglichen werden müssen, die zumindest heute noch wesentlich billiger und technisch einfacher zu nutzen sind. Damit fällt eine Reihe nicht-westlicher Länder, die im Zuge der sogenannten Schurkenstaatdebatte ins Zentrum der aktuellen Proliferationsanalysen geraten ist, bei der Fusionsfrage wieder etwas aus dem Fokus. Dafür wird vielleicht in den nächsten Jahrzehnten eine neue Klasse von Akteuren interessant: Es sind dies all jene Kernenergie nutzenden Länder, in denen es nur Fusionsreaktoren gibt, sei es weil man aus der herkömmlichen (auf Kernspaltung basierenden) Kernenergie ausgestiegen ist, sei es weil man als Späteinsteiger der Kernenergie sofort auf Fusionskraftwerke gesetzt hat.²¹ Da neue empirisch-quantitative Studien aber einen kausalen Zusammenhang zwischen der Verfügbarkeit von Nukleartechnologien und der nichtfriedlichen Nutzung der Kernenergie behaupten, steigen nach dieser Lesart langfristig auch die Proliferationsgefahren ziviler Fusionstechnik (Fuhrmann 2009). Die Verbreitung dieser neuen Energiequelle setze Staaten einer Versuchung aus, welcher sie möglicherweise nicht immer widerstehen können.

Zusammenfassend hat die obige Betrachtung möglicher Proliferations Szenarien der Kernfusion gezeigt, dass man sich bei der Risikoabschätzung dieser Zukunftstechnologie nicht auf die „üblichen Verdächtigen“ beschränken sollte, die heute im Fokus der (westlichen) Nichtverbreitungsdebatten stehen, sondern seinen Blick auch auf fortgeschrittene Kernenergieländer und etablierte Kernwaffenstaaten weiten sollte. Denn die beiden letzteren sind die wahrscheinlicheren Kandidaten einer nicht-friedlichen Nutzung der Kernfusion im 21. Jahrhundert.

4. Regulierungs- und Gestaltungsoptionen für eine friedliche Nutzung der Kernfusion

Die regulatorischen Möglichkeiten der internationalen Gemeinschaft gegen eine militärische Nutzung der Kernfusion sind aus heutiger Perspektive beschränkt. Dies ist in erster Linie der Tatsache geschuldet, dass die meisten atomwaffenbesitzenden Staaten bis zum heutigen Tag kaum rechtlich wirksamen Restriktionen hinsichtlich einer nicht-

20 Zu diesem potentiellen Nutzerkreis der Kernfusion außerhalb des ITER-Konsortiums gehören sicherlich noch Argentinien und Brasilien, welche bereits fortgeschrittene Nuklearprogramme haben und die in der Kernenergie nach wie vor eine bedeutende Zukunftsoption ihrer jeweiligen Energieversorgung sehen.

21 Es gibt eine Reihe von ITER-Mitgliedern, die bereits aus der Kernenergie (Kernspaltung) ausgetreten sind (z.B. Italien) oder den Ausstieg planen (z.B. Belgien, Deutschland, Spanien und möglicherweise Japan); es ist nicht ausgeschlossen, dass diese Länder in einigen Jahrzehnten über die Kernfusion wieder in die Kernenergie einsteigen und dann reine Fusionsenergieländer wären. Dasselbe gilt für die Schweiz, die assoziiertes ITER-Mitglied ist. Aber auch für das „atomfreie“ Österreich ist ein Einstieg in die Kernfusion nicht per se ausgeschlossen, weil das 676. Bundesverfassungsgesetz aus dem Jahr 1978 lediglich die „Nutzung der Kernspaltung für die Energieversorgung“ in der Alpenrepublik verbietet, nicht aber die Kernfusion.

friedlichen Nutzung der Kernenergie (und damit auch der Kernfusion) unterworfen sind.²² Dieses Rechtsvakuum hat zur Folge, dass mit der Verfügbarkeit kommerzieller Fusionsreaktoren (oder bereits in der DEMO-Phase) den Nuklearmächten eine Reihe neuer militärischer Optionen offenstehen werden, die von der Tritiumabzweigung bis zur Spaltmaterialproduktion für Waffenzwecke reichen.

Da China, Frankreich, Großbritannien, Indien, Russland und die Vereinigten Staaten am ITER-Projekt beteiligt sind und somit wahrscheinlich zu den ersten Nutzern und Anbietern dieser Zukunftstechnologie gehören werden, werden für diese sechs Nuklearmächte auch internationale Exportkontrollregelungen wenig Wirkung zeigen (Exportkontrollen zielen auf Abnehmer). Auf die Kernfusion zugeschnittene Exportkontrollen könnten lediglich die Technologiediffusion zu den übrigen, nicht an ITER beteiligten Atommächten (heute wären dies Israel, Nordkorea und Pakistan), verlangsamen.

Anders sieht es für die Nichtkernwaffenstaaten (NKWS) des NVV aus: Für diese immerhin 183 Staaten umfassende Ländergruppe würde im Prinzip die Kombination von Exportkontrollen und geeigneten nuklearen Sicherungsmaßnahmen (Safeguards) einen gewissen Schutz vor einer nicht-friedlichen Nutzung der Kernfusion bieten.²³ Denn Safeguards erlauben (idealerweise) die frühzeitige Entdeckung einer nicht-friedlichen Nutzung und Exportkontrollen schränken (idealerweise) den Technologietransfer auf „zuverlässige“ Länder ein. Das hieße, dass grundsätzlich nur solche NKWS mit Fusions-technik beliefert werden sollten, welche ihre Nichtverbreitungspflichten vertragstreu erfüllen und an den entsprechenden Anlagen Safeguards akzeptieren; und dass alle Fusionsreaktoren (auch Eigenentwicklungen) in NKWS geeigneten Sicherheitsmaßnahmen unterworfen sein sollten, die sicherstellen sollen, dass weder fertiles Ausgangs- noch besonderes spaltbares Material, welches in diesen Anlagen verwendet wird oder entsteht, für nicht-friedliche Zwecke benutzt wird.

Die praktische Implementierung dieser einfachen Grundsätze wird allerdings vor dem Hintergrund existierender Safeguardsregularien nicht reibungslos vonstatten gehen. Denn noch passen die Safeguardsverträge der IAEO und die Zukunftstechnologie Kernfusion nicht zusammen.

22 Die fünf Kernwaffenstaaten des nuklearen Nichtverbreitungsvertrages (NVV) unterliegen einer schwachen Abrüstungsnorm, die sie lediglich dazu verpflichtet, „in redlicher Absicht Verhandlungen zu führen über wirksame Maßnahmen zur Beendigung des nuklearen Wettrüstens in naher Zukunft und zur nuklearen Abrüstung“, aber zu dieser Auflage keine konkreten Fristen setzt. Indien hat sich zumindest verpflichtet, einen Teil seines Nuklearkomplexes ausschließlich zivil zu nutzen (und dies von der IAEO überprüfen zu lassen), während es für Israel und Pakistan keine rechtlich bindenden Restriktionen hinsichtlich der jeweiligen Nuklearprogramme gibt. Lediglich Nordkorea unterliegt gemäß der UN-Sicherheitsresolutions 1718 (2006), 1874 (2009) und 2087 (2013) einer völkerrechtlich bindenden Abrüstungsverpflichtung, welcher Pjöngjang allerdings bis heute nicht nachkommt.

23 Artikel III (1) des NVV verpflichtet jeden NKWS zu sogenannten Sicherungsmaßnahmen (Safeguards) seiner Nuklearanlagen, welche mit der IAEO auszuhandeln sind und von der IAEO zu überprüfen sind. Art. III (2) verpflichtet alle Vertragsparteien „Ausrüstungen [...], die eigens für die [...] Herstellung von besonderem spaltbarem Material vorgesehen oder hergerichtet sind, einem Nichtkernwaffenstaat für friedliche Zwecke nur dann zur Verfügung zu stellen, wenn das Ausgangs- oder besondere spaltbare Material den nach diesem Artikel erforderlichen Sicherungsmaßnahmen unterliegt.“

4.1 Safeguards und Fusionsreaktoren: der Ist-Zustand

Beim derzeit häufigsten Safeguardsabkommen der IAEA (für Details siehe Appendix), dem sogenannten Comprehensive Safeguards Agreement (CSA) liegt der Hauptfokus nicht auf den Anlagen eines Nuklearprogramms, sondern auf dem Nuklearmaterial, so dass Anlagen ohne nennenswerte Mengen an Nuklearmaterial geringen bis gar keinen Berichtspflichten obliegen. Dies hat zur Folge, dass von der IAEA primär nur solche Anlagen ins Visier genommen werden, in denen vorgesehen ist, hinreichende Mengen an Nuklearmaterial zu verwenden oder zu erzeugen. Die Nutzung oder Erzeugung von nuklearem Material ist aber weder für ITER noch für „reine“ Fusionsleistungsreaktoren, wie sie etwa von der EFDA konzeptualisiert wurden, vorgesehen. Somit gilt prima facie für alle Fusionsanlagen, die nur auf die Fusion von D und T abzielen, dass diese Anlagen trotz ihres Potentials zur Erzeugung von spaltbarem Material (und trotz ihrer enormen Tritiumvorräte) nicht per se in den Zuständigkeitsbereich der Safeguardsabteilung der IAEA fallen.²⁴

Diese Vermutung wurde bereits 2005 in einer EFDA-Studie vorweggenommen („None of the materials required are subject to the provisions of non-proliferation treaties“, Maisonnier et al. 2005: 5) und wurde während eines IAEA-Expertenworkshops im Juni 2013 von Mitarbeitern der Agency wiederholt: Zwar sei das Problem bekannt, aber es werde davon ausgegangen, dass aus den derzeitigen Safeguardsabkommen keine Verpflichtung abgelesen werden könne, Safeguards an reinen Fusionsanlagen anzuwenden.²⁵ Anders verhält es sich selbstverständlich bei Hybridreaktoren, die bereits im Normalbetrieb Nuklearmaterial nutzen und demnach unter Safeguards fallen.

Die Betriebsblindheit der Safeguardsregularien gegenüber (reinen) Fusionsreaktoren ist vor dem historischen Hintergrund verständlich, dass Kernfusion bisher als reine Grundlagenforschung betrieben wurde, und der in den Safeguardsabkommen zentrale Begriff des „Reaktors“ in der Praxis gewöhnlich mit Kernspaltung, Kettenreaktion und dem entsprechenden Nuklearmaterial assoziiert wird. Dennoch ist diese Unschärfe auf lange Sicht unbefriedigend, weil Fusionsanlagen mit hochintensiver Neutronenproduktion – wie etwa DEMO und die hier diskutierten kommerziellen Fusionsprototypen – das technische Potential haben, signifikante Mengen an spaltbarem Material zu erzeugen.²⁶ Falls entsprechende Anlagen also nicht deklariert und adäquat überwacht werden, eröffnet sich zwischen den Maschen der existierenden Safeguardsabkommen ein gefährliches

24 Man beachte, dass weder D noch T von der IAEA als *nuclear material* betrachtet werden und demnach D-T-Fusionsanlagen – ungeachtet der Waffenrelevanz von Tritium – keine Safeguards nach sich ziehen.

25 Die vorsichtige Formulierung an dieser Stelle ist der Tatsache geschuldet, dass die Fusionstechnik sowohl für die Safeguards- als auch für die Rechtsabteilung der IAEA Neuland darstellt und der interne Meinungsbildungsprozess zu dieser Zukunftstechnologie noch nicht abgeschlossen ist. Eine ähnliche Unschärfe existiert auch bezüglich anderer intensiver Neutronenquellen wie etwa den beschleunigergetriebenen Spallationsneutronenquellen, siehe dazu Englert/Liebert 2010.

26 Theoretisch wären auch „neutronenarme“ Fusionsreaktoren denkbar (z.B. Fusion eines Protons p mit dem Element Bor, p-¹¹B), sie sind aber technisch wesentlich anspruchsvoller als die „neutronenreiche“ D-T-Fusion. Da die Spaltmaterialproduktion im Fusionsreaktor über den Neutroneneinfang der „Fusionsneutronen“ erfolgt, wäre ein „neutronenarmer“ Reaktor wesentlich proliferationsresistenter (und nebenbei auch weniger radioaktiv) als es die neutronenreichen D-T-Reaktoren sind (Hora et al. 2010).

Schlupfloch: Denn theoretisch kann ein Nichtkernwaffenstaat fertiles Ausgangsmaterial von bis zu zehn Tonnen Natur-Uran oder bis zu zwanzig Tonnen Thorium bzw. angereichertes Uran im CSA aus der Berichtspflicht abkoppeln.²⁷ Der Einsatz schon deutlich geringerer Mengen dieser nicht-deklarierten Materialien in einer nicht überwachten Fusionsanlage würde aber zur Produktion mehrerer kritischer Plutoniummassen (oder im Falle von Thorium: mehrerer kritischer ²³³U-Massen) reichen.

Wenn also in einem Land Fusionsanlagen keiner Kontrolle unterliegen und gleichzeitig nukleares Ausgangsmaterial von Safeguards ausgenommen werden kann, können hinter dem Rücken der Agency bedeutende Mengen an waffenfähigem Spaltmaterial produziert werden, obwohl ein umfassendes Safeguardsabkommen (CSA) in Kraft ist!

Dieses Schlupfloch lässt sich auch nicht vollständig durch das Zusatzprotokoll (siehe Appendix) schließen. Das Additional Protocol (AP) räumt zwar der IAEA weitergehende Inspektionsrechte ein als das CSA und erlaubt der Agency beispielsweise, Designinformationen von Anlagen zu verlangen, welche zwar kein Nuklearmaterial im Normalbetrieb, aber dafür hohe Produktionskapazitäten von Spaltmaterial aufweisen (was etwa bei D-T-Fusionsanlagen der Fall wäre). Ebenso können solche Anlagen gemäß dem Zusatzprotokoll bei Verdachtsmomenten inspiziert werden. Jedoch sieht auch das Additional Protocol keine Routinekontrollen in Fusionskraftwerken vor. Zudem haben viele Staaten das Zusatzprotokoll nicht unterschrieben, darunter Länder mit bedeutenden Nuklearaktivitäten wie Argentinien, Brasilien, Ägypten, Nordkorea und Venezuela.²⁸

4.2 Safeguards für Fusionsreaktoren: wo ansetzen?

Die Integration der Kernfusion in das internationale Safeguardsregime wird sicherlich mehrere Jahre in Anspruch nehmen, da bedeutende Hürden überwunden werden müssen: Erstens müssen die existierenden Safeguardsabkommen der Fusionsherausforderung angepasst werden, damit zwischen IAEA und Mitgliedsstaaten Rechtsklarheit besteht, auf welche Anlagen und Technologien sich zukünftige Safeguards beziehen sollen und wo die Inspektionsrechte der IAEA ihre Grenzen finden sollen. Der Artikel 23 des CSA sieht diesbezüglich die Möglichkeit der Vertragsanpassung vor, solange die Änderungen von beiden Seiten – IAEA und Mitgliedsstaat – akzeptiert werden. Für die Zwecke der Fusion würde es wahrscheinlich genügen, im definitorischen Teil des CSA (Art. 106) einen breiteren Anlagen- bzw. Reaktorbegriff vorzuschlagen, der explizit Kernspaltung und –fusion miteinschließt. In der praktischen Umsetzung würde dies bedeuten, dass in den nationalen Deklarationen der Mitgliedsländer nicht nur eine vollständige Nuklear-

27 International Atomic Energy Agency 1972, Art. 37 (b) und (d).

28 Iran hat das AP zwar unterzeichnet, aber bis zur Fertigstellung dieses Reports nicht ratifiziert. Im Rahmen der gegenwärtigen Verhandlungen zum iranischen Atomprogramm wird von den P5+1 mit Nachdruck die iranische Ratifizierung des AP gefordert.

materialbilanz erstellt werden müsste, sondern explizit auch die Abwesenheit von Nuklearmaterial ab einer zu bestimmenden Menge in Fusionsreaktoren erklärt werden müsste.²⁹

Zweitens muss an der technischen Konzeptualisierung und Entwicklung von Safeguards im Fusionsreaktor gearbeitet werden. Hier muss ein geeignetes Überwachungsinstrumentarium entwickelt werden, das sicherstellt, dass sich kein fertiles Ausgangsmaterial vor der Inbetriebnahme des Reaktors in der Anlage befindet, dass während des Betriebs kein Spaltmaterial im Reaktor produziert wird und dass in den bestrahlten und ausgetauschten Anlagenteilen (insbesondere in den Brutblankets) kein Nuklearmaterial vorhanden ist. Hierzu stehen bereits eine ganze Reihe etablierter Verifikationstechniken zur Verfügung, die man allerdings am konkreten Beispiel des Fusionsreaktors erproben und optimieren müsste.³⁰

Auch wenn ITER sich deutlich von zukünftigen Leistungsreaktoren unterscheiden wird, macht es dennoch Sinn, bereits in Cadarache erste Safeguardsansätze zu erproben: Denn der kritischste Moment für die militärische Nutzung des Fusionsreaktors besteht in den Phasen des Blanketaustauschs am Reaktor, wo theoretisch Nuklearmaterial in die Anlage eingeführt oder von der Anlage gebracht werden kann. Dieser Austausch wird beim Leistungsreaktor relativ selten vorkommen (alle 1-2 Jahre), während er am Experimentalreaktor ITER häufiger zu erwarten ist, da in Cadarache verschiedene Blanketkonfigurationen getestet werden sollen. Somit bietet sich hier die Möglichkeit, mit einem breiten Instrumentarium an Analysetools die Abwesenheit von Nuklearmaterial in den frischen sowie in den bestrahlten Blankets zu überprüfen und entsprechende Verifikationsroutinen am Fusionsreaktor zu entwickeln.

Dazu bedarf es drittens der Sensibilisierung der Community der Fusionsforscher/innen für die Nichtverbreitungsherausforderungen ihres Forschungsgegenstandes. Dieser Umstand ist nicht gänzlich trivial, da das ITER-Projekt aufgrund seiner Mehrkosten und Zeitplanüberschreitungen seit einigen Jahren von seinen Geldgebern kritisch hinterfragt wird. Dabei befürchten einige Experten, dass eine zusätzliche Diskussionsfront, welche die Nichtverbreitungsdimension dieser Technologie anspricht, die Skepsis einiger Sponsoren verstärken und das ITER-Projekt insgesamt gefährden könnte. Diese Befürchtung der Fusionsforscher/innen ist allerdings teilweise unbegründet, denn der Bedarf an Humankapital für die hier skizzierte Safeguardsforschung beläuft sich auf wenige Personenjahre, der Technologieeinsatz wäre – verglichen mit den kostspieligen Hightech-Materialien im ITER-Projekt – vernachlässigbar und somit der Kostenfaktor innerhalb des Milliardenprojekts ITER unbedeutend. Außerdem wären die Fusionsforscher/innen gut beraten, sich einer sensitiven Frage wie der Nichtverbreitung frühzeitig zu nähern, um bei späteren

29 Sehr geringe Mengen an spaltbarem Material werden in der Messtechnik oder zu Forschungszwecken in Fusionsanlagen benötigt.

30 Zu diesen Technologien gehören die Gamma- und Neutronenspektroskopie, aber auch einfache Verfahren der optischen Inspektion und des Wiegens der Brutblankets, die Detektion von Spaltisotopen, sowie chemische Offsite-Analysen des Blanketinhalts. Daneben ließen sich auch Fernüberwachungsmöglichkeiten der Anlage mit Kameras und ähnlichem Equipment testen.

Nachfragen der Politik und der Zivilgesellschaft auf bereits laufende Safeguardsforschungen verweisen und damit potentieller Kritik den Wind aus den Segeln nehmen zu können.

5. Erste Schritte auf dem Weg zur friedlichen Kernfusion

Obwohl sich ITER noch in der Bauphase befindet, DEMO-Reaktoren frühestens Ende der 2020er Jahre in Betrieb gehen und die kommerzielle Fusion – wenn überhaupt – erst Mitte des Jahrhunderts beginnen könnte, ist es ratsam, bereits heute erste Schritte zu unternehmen, um diese Zukunftstechnologie möglichst proliferationsresistent zu gestalten. Diese Forderung vorbeugender Rüstungskontrolle gründet dabei auf der Erfahrung der letzten Jahrzehnte, im Bereich sensitiver Technologien möglichst frühzeitig mit geeigneten rüstungskontrollpolitischen Maßnahmen zu reagieren, welche im Idealfall die Technologieentwicklung selbst miteinschließen (Neuneck/Mutz 2000). Im spezifischen Fall nuklearer Technologien lässt sich hier unmittelbar an die aktuellen Diskussionen rund um die Frage der Proliferationsresistenz anschließen, welche im traditionellen Kernenergiesektor wachsende Akzeptanz finden (für eine Übersicht zum Konzept der Proliferationsresistenz siehe (International Atomic Energy Agency 2010, und Appendix). Die Einbindung der Fusionsforschung in diesen Diskurs ist dabei unerlässlich und kann durch folgende Maßnahmen gestärkt werden: Erstens wäre es wünschenswert, wenn die Berührungspunkte zwischen der Fusions- und der Safeguardscommunity stärker institutionalisiert würden. Ein erster Schritt in diese Richtung könnte die Inklusion spezifischer Safeguardsfragen in die zukünftigen IAEO-Workshops zum DEMO-Programm sein. Diese Workshopreihe begann 2012 und soll einmal im Jahr die wichtigsten Akteure anwendungsorientierter Fusionsforschung zusammenbringen.

Zweitens sollte die Safeguardsentwicklung für Fusionsreaktoren so früh wie möglich (d.h. jetzt) angegangen werden. Diese Forderung fußt auf der jahrzehntelangen Erfahrung, dass sich gerade Safeguards als besonders effektiv, kostengünstig, und betriebsfreundlich erwiesen haben, wenn sie in einem frühen Stadium der Technologieentwicklung auf den Weg gebracht wurden. Im Idealfall sollte die Safeguards- und Technologieentwicklung daher quasi gleichzeitig verfolgt werden (International Atomic Energy Agency 2009). Wer sich also bei der Kernfusion am innovativen Konzept „Safeguards by Design“ orientieren will, muss Safeguardsforschung und -implementierung schon heute in Angriff nehmen. ITER bietet dazu eine ideale Testumgebung, in erster Linie aufgrund der für die nächsten Jahre vorgesehenen Tests verschiedener Blanketkonfigurationen.

Ein Expertenworkshop in Wien vom Juni 2013 hat zudem ergeben, dass die IAEO Bedarf an entsprechender Expertise hat, ihr aber kaum Mittel für die Untersuchung dieser Fragestellung zur Verfügung stehen.³¹ Damit sind die nationalen Unterstützungsprogramme der IAEO in einer herausgehobenen Rolle, auf die zukünftigen Herausforderungen

31 Die beiden Autoren dieses Reports nahmen vom 26. bis 28. Juni 2013 an einem von der IAEO organisierten Expertenworkshop zum Thema der „Non-Proliferation Challenges in Connection with Magnetic Fusion Power Plants“, teil.

der Kernfusion erste Antworten bereitzustellen und in den nächsten Jahren entsprechende Forschungsaufgaben in Angriff zu nehmen. Insbesondere das deutsche Unterstützungsprogramm kann aufgrund seiner vertieften Expertise im Bereich der Fusions- und der Safeguardsforschung hier eine herausragende Rolle spielen. Sollte sich ein nationaler Alleingang als politisch zu sensitiv erweisen, könnte man auch versuchen, im europäischen Verbund (etwa im Joint Research Centre der Europäischen Kommission) entsprechende Expertise aufzubauen.

Neben klassischer Safeguardsforschung, die auf die Bilanzierung von Nuklearmaterial optimiert ist, bietet sich auch an, die Materialbilanzen des waffentauglichen Wasserstoffisotops Tritium zu optimieren, welches in einer Kernfusionswelt in noch nie da gewesenen Dimensionen produziert, konsumiert, transportiert und gelagert werden wird. Auch wenn die Materialbuchhaltung möglicherweise nicht in einer Auflösung erfolgen kann, welche für sicherheitspolitische Zwecke erforderlich wäre (Gramm-Mengen), so würde es dennoch von Nutzen sein, die Grenzen zukünftiger Tritiumbilanzen in der konkreten Anlagenpraxis genauer zu bestimmen. Auch hier bietet ITER ein ideales Testumfeld.

Drittens muss aus einer Nichtverbreitungsperspektive klar vor Hybridreaktoren, die Kernfusion und Kernspaltung kombinieren, gewarnt werden. Durch die kontinuierliche Produktion von spaltbarem Material und Tritium sind diese Reaktoren quasi virtuelle Kernwaffenarsenale und ihre zeitnahe Kontrolle eine besonders schwierige Herausforderung, die gerade in politischen Krisen zu raschen Eskalationen führen könnte.³² Daneben hat ein auf Hybridreaktoren basiertes Atomprogramm zur Folge, dass tonnenweise separiertes Plutonium zu den verschiedensten Anlagen (Wiederaufarbeitungsanlage, Brennelementefabrik, Spaltreaktoren) transportiert werden muss, was zusätzliche Unfall- und Terrorrisiken nach sich zieht (zur Größenordnung dieser Plutoniumkreisläufe siehe Goldston 2011). ITER-Partnerländer außerhalb der EU, die bereits offen Sympathie für *fission-fusion hybrids* gezeigt haben (wie etwa China und die Vereinigten Staaten), sollten daher für die sicherheitspolitische Dimension dieser Reaktorkonzepte sensibilisiert werden.

Die vierte Empfehlung ist politisch sensibel und doch gleichzeitig unerlässlich. Nichtkernwaffenstaaten, die an ITER beteiligt sind (u.a. die Bundesrepublik Deutschland) haben ein legitimes Interesse, dass keine der am Projekt beteiligten Atommächte in späteren „nationalen“ Anwendungen der Kernfusion die Technologie für militärische Zwecke nutzt. Dies würde dem Geist des ITER-Abkommens entgegenlaufen, welches die Kooperation ehemals rivalisierender Großmächte fördern soll, und es wäre ein Affront gegen alle am Projekt beteiligten Nichtkernwaffenstaaten, denn die finanziellen und fachlichen Beiträge Deutschlands, Japans, Südkoreas und vieler nichtnuklearer EU-Staaten waren für das Zukunftsprojekt einer kommerziellen Kernfusion bedeutend und sie bleiben für den weiteren Erfolg der Fusionsherausforderung unverzichtbar.

32 Man bedenke, was es bedeuten würde, wenn im Iran ein derartiger Reaktor in Betrieb wäre, der jedes Jahr das Bombenmaterial hunderter (geboosteter) Sprengköpfe produzieren könnte. Das heutige iranische Atomprogramm verfügt über eine die Produktionskapazität von etwa 1-2 (ungeboosteter) Sprengköpfe pro Jahr und bereits diese Fähigkeit gilt weiten Teilen der internationalen Gemeinschaft als inakzeptabel.

Im Sinne des ITER-Abkommens sollte daher verhindert werden, dass die Atommächte dieses kritische Know-how für ihre nationalen Interessen usurpieren und etwa mithilfe der gemeinsam entwickelten Fusionsanlagen später ihre Kernwaffenarsenale ausbauen und modernisieren.³³ Die rechtliche Handhabe gegen ein solches Szenario ist – wie erwähnt – heute immer noch defizitär. Dies sollte die Politik allerdings nicht daran hindern, von den an ITER beteiligten Atommächten ein klares Bekenntnis zur ausschließlich friedlichen Nutzung der Kernfusion auch außerhalb der ITER-Vereinbarung zu verlangen. Der erste Schritt dazu könnte ein entsprechender Code of Conduct sein, und der zweite die Versicherung, dass auf alle im Fahrwasser von ITER entwickelten Fusionsreaktoren Safeguards angewendet werden sollen, unabhängig ob sie in Kernwaffen- oder in Nichtkernwaffenstaaten stehen werden. Die Initiative für eine solche Regelung wird kaum von den Atomwaffenbesitzern ausgehen, weshalb hier idealerweise im ersten Schritt das konzertierte Vorgehen einiger nichtnuklearer ITER-Mitglieder notwendig sein wird. Es ist aber auch nicht ausgeschlossen, dass sich in einem zweiten Schritt die eine oder andere Atommacht der Forderung einer umfassenden Absicherung der Kernfusion anschließen könnte. So wäre es durchaus denkbar, dass sich die gesamte EU das Prinzip universaler Safeguards für die Kernfusion zueigen machen könnte, haben doch Frankreich und Großbritannien wiederholt ihren Verzicht auf zukünftige Spaltmaterialproduktion für Waffenzwecke erklärt.

Unabhängig von der Positionierung der Atommächte bleibt festzuhalten: Der Ruf nach einem globalen Safeguardsregime für die Kernfusion ist eine zumutbare Forderung, die den sicherheits- und energiepolitischen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts mehr als angemessen ist.

6. Appendix

6.1 Fusions- und Spaltreakortypen

In den hier diskutierten Fusionsreaktoren werden die (leichten) Wasserstoffisotope Deuterium (D) und Tritium (T) bei sehr hohen Temperaturen miteinander verschmolzen, um damit Energie zu gewinnen und in Strom umzuwandeln (siehe Appendix V.2). Damit unterscheiden sich Fusionsreaktoren fundamental von den zur Kernenergieerzeugung bisher eingesetzten Spaltreaktoren. In Spaltreaktoren werden die Atomkerne des (schweren) Uranisotops ²³⁵U durch Neutronen gespalten und damit Energie freigesetzt. Da bei jeder Kernspaltung auch 2-3 Neutronen freigesetzt werden, die weitere Kerne spalten können, kommt es zu einer Kettenreaktion. In einem Spaltreaktor wird die Kettenreaktion kontrolliert, indem die Neutronenpopulation im Reaktorkern genau geregelt wird, damit keine abrupte Vermehrung von Neutronen wie in einer Kernwaffe auftritt. Da langsame

33 Der Artikel 20 des ITER-Abkommens spricht hier eigentlich Klartext („The ITER Organization and the Members shall use any material, equipment or technology generated or received pursuant to this Agreement solely for peaceful purposes“ Agreement on the Establishment of the ITER International Fusion Energy Organization for the Joint Implementation of the ITER Project 2007). Diese Norm sollte auch für alle ITER-Folgeprojekte übernommen werden.

Neutronen Uran besser spalten, müssen die in jeder Kernspaltung freigesetzten schnellen Neutronen durch Stöße mit einem leichten Element oder Molekül abgebremst werden (sogenannte Moderation).

Heute werden weltweit kommerziell vor allem zwei Grundtypen von Spaltreaktoren eingesetzt, die sich durch den eingesetzten Moderator unterscheiden: Leichtwasserreaktoren und Schwerwasserreaktoren. In Schwerwasserreaktoren kann nur Natururan, mit 0,7% Anteil des Uranisotops ^{235}U (der Rest besteht aus dem nicht sehr spaltaffinen ^{238}U) eingesetzt werden. Für den Einsatz in Leichtwasserreaktoren muss der Anteil des ^{235}U auf 3-5% angereichert werden.³⁴

Die Geschwindigkeit der Neutronen in Leichtwasser-, Schwerwasser- und Graphitreaktoren wird durch den Einsatz des jeweiligen Moderators stark reduziert, bis die Neutronen sich der Umgebung angepasst haben (thermische Neutronen). Eine zweite Klasse von Reaktortypen sind die sogenannten schnellen Reaktoren, in denen die Neutronen weniger stark abgebremst werden. Schnelle Reaktoren befinden sich seit mehreren Jahrzehnten in der Entwicklung, haben jedoch aufgrund technischer Probleme und hoher Kosten bisher nicht die Marktreife erreicht.

In allen Spaltreaktortypen, die Uran verwenden, entsteht Plutonium, so dass solche Reaktoren durch die IAEO kontrolliert werden müssen. Proliferationsrelevant ist bei Schwerwasserreaktoren zudem die Möglichkeit, Brennelemente im laufenden Betrieb auszutauschen, um dann das darin entstandene Plutonium abzutrennen. In Leichtwasserreaktoren besteht diese Möglichkeit nicht, denn während des Betriebs muss der Druckbehälter, der den Reaktorkern enthält, geschlossen bleiben. Eine verdeckte Entnahme von Brennelementen außerhalb der Wartungsperioden ist daher nicht möglich. Allerdings sind Leichtwasserreaktoren auf schwachangereichertes Uran mit einem Anteil von 3-5% ^{235}U angewiesen. Die entsprechenden Anlagen zur Urananreicherung haben aber das Potential, auch für militärische Zwecke auf Hochanreicherung mit einem Anteil über 90% ^{235}U umgestellt zu werden.

Je schneller die Neutronen in einem Reaktor sind, desto besser ist das aus dem Uran entstandene Plutonium für den Waffeneinsatz geeignet. Diese Eigenschaft sorgt dafür, dass die Plutoniumproduktion in einem Fusionsreaktor für einen Proliferator sehr attraktiv ist, da in der Fusionsreaktion sehr energiereiche und daher schnelle Neutronen entstehen. Ähnlich verhält es sich in schnellen Spaltreaktoren, die ebenfalls besonders gut für die Produktion von Waffenplutonium geeignet sind. Im ersten Fall spricht man meistens von einem Hybridreaktor (*fusion-fission hybrid*), im zweiten Fall von einem schnellen Brüter (*fast breeder reactor*).

34 Neben leichtem und schwerem Wasser gibt es noch weitere Moderatoren wie etwa Graphit. Graphitreaktoren kamen vor allem in militärischen Programmen zur Spaltmaterialproduktion zum Einsatz, spielen aber kommerziell keine Rolle.

6.2 Proliferationsresistenz

Proliferationsresistenz ist ein Konzept zur Beurteilung der Robustheit einer nuklearen Technologie gegen eine militärische Nutzung. Zur Proliferationsresistenz tragen also diejenigen Charakteristiken eines nuklearen Systems bei, die eine Abzweigung oder nicht deklarierte Produktion von Waffenmaterial oder eine militärische Nutzung einer Technologie durch Staaten behindern, die sich Zugriff auf Kernwaffen verschaffen möchten (International Atomic Energy Agency 2002). Zu beachten ist, dass Proliferationsresistenz keine absolute Sicherheit gegen Proliferation garantiert, sondern Proliferationsresistenz nur relativ zu einer Alternative festgestellt werden kann. Eine bestimmte nukleare Technologie ist resistenter als eine andere. Absolute Proliferationssicherheit (*proliferation proof*) ist damit nicht gemeint. Erreicht wird Proliferationsresistenz durch eine Kombination von technischen Faktoren, Betriebsmodalitäten, institutionellen Arrangements und Safeguardsmaßnahmen.

Die Literatur unterscheidet zwischen intrinsischen und extrinsischen Faktoren, welche die Proliferationsresistenz unterstützen. Extrinsische Faktoren umfassen alle Maßnahmen, die von Staaten oder internationalen Institutionen durchgeführt werden, etwa Selbstverpflichtungen, bilaterale Abkommen, legale und institutionelle Arrangements und alle Überwachungs- und Kontrollmaßnahmen (Safeguards).

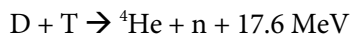
Mit intrinsischen Faktoren sind Eigenschaften gemeint, die in der spezifischen technologischen Auslegung einer Technologie selbst begründet sind. Ein „reiner Fusionsreaktor“ ist intrinsisch proliferationsresistenter als etwa ein Spalt-Fusions-Hybridreaktor. Denn ein reiner Fusionsreaktor müsste zunächst umständlich umgebaut werden, um spaltbares Material aufnehmen zu können. In einem Hybridreaktor wäre die Verwendung spaltbaren Materials aber bereits Teil des Reaktorkonzepts. Intrinsische Proliferationsresistenz kann auch die Anwendung extrinsischer Maßnahmen erleichtern, indem etwa schon bei der Planung einer Anlage die Anwendung von Safeguards vorgesehen wird (Safeguards by Design). Besonders nützlich ist etwa die Eigenschaft eines reinen Fusionsreaktors, dass unter normalen Umständen kein nukleares Material genutzt wird. Dies erleichtert die Anwendung extrinsischer Safeguardsmaßnahmen z.B. durch Messungen, mit denen die Abwesenheit nuklearen Materials festgestellt werden kann. Der Aufwand würde sich dramatisch erhöhen, wenn nukleares Material unter normalen Betriebsbedingungen verwendet würde und Materialbilanzen erstellt werden müssten, anstatt nur die Abwesenheit von Nuklearmaterial feststellen zu müssen.

6.3 Ein Beispiel für einen Fusionsreaktor – Das Modell PPCS-A

Der ab 2050 anvisierte kommerzielle Fusionsreaktor PPCS-A³⁵ (Bild 1) baut ähnlich wie seine Vorläufer ITER und DEMO auf dem sogenannten Tokamakprinzip auf: Ein Plasma

35 Die EFDA Studie stellt vier Konzepte für ein zukünftiges kommerzielles Leistungskraftwerk vor, die Konzepte PPCS (Power Plant Conceptual Study) A, B, C und D. Das Reaktorkonzept A sieht den Einsatz bereits bekannter Materialien und Technologien vor, die schon heute in der Spaltreaktortechnologie einge-

aus dem schweren und superschweren Wasserstoffisotopen Deuterium (D) und Tritium (T) wird in einer torusförmigen Reaktorkammer magnetisch eingeschlossen und stark erhitzt. Ist die Temperatur des Plasmas groß genug, fangen die Deuterium und Tritium Atomkerne an miteinander zu Helium (He) zu fusionieren und setzen dabei ein hochenergetisches Neutron (n) frei, nach der Formel:



Der letzte Term steht für die freigesetzte Energie des Prozesses, die sich auf die Bewegungsenergie des Helium und des Neutrons aufteilt. Die entstehenden hochenergetischen schnellen Neutronen sind nicht im Magnetfeld gefangen und tragen den Großteil der Energie – etwa 80 Prozent – in die Wand der Reaktorkammer. Die (toroidale) Plasmakammer ist umgeben von komplex gearbeiteten Aufprallschichten (engl. Blankets) verschiedener Größe, Breite und Form (Bild 1), und sind einem intensiven Neutronenfluss aus der D-T-Reaktion in der Plasmakammer ausgesetzt. Im Material der Blankets werden die Neutronen abgebremst und erzeugen Hitze, die durch Wasserkühlungen nach außen transportiert und in einer externen Turbinenhalle zur Stromerzeugung genutzt wird. Das andere Reaktionsprodukt die „Heliumasche“ wird auf den Boden des Reaktors gelenkt und gibt dort im sogenannten „Divertor“ seine Energie durch Aufprall an das Divertormaterial ab.

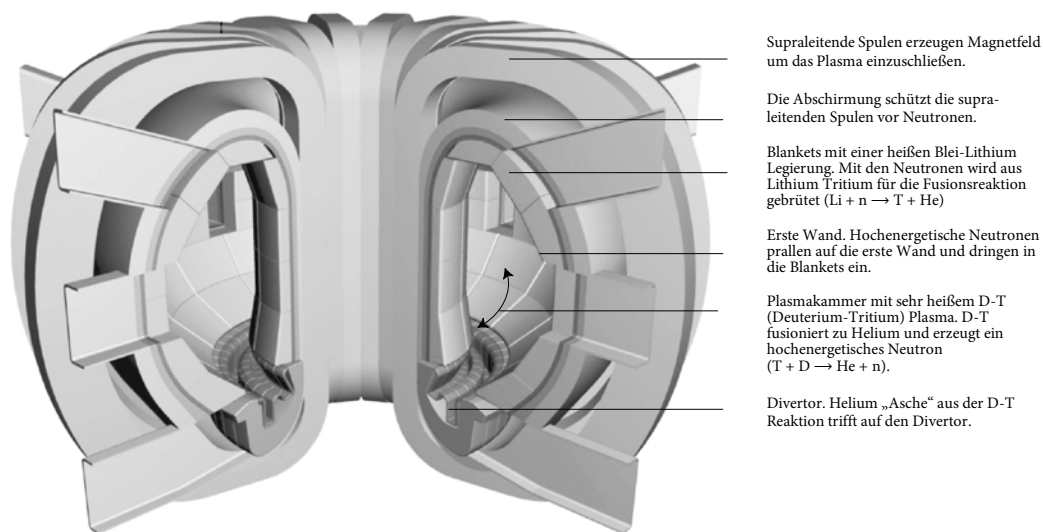
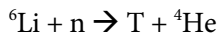


Bild 1: Schematische Darstellung eines kommerziellen Fusionsreaktors.

Quelle: Massonier, D. et al., „A Conceptual Study of Commercial Fusion Power Plants: Final Report of the European Fusion Power Plant Conceptual Study (PPCS),“ EFDA-RP-RE-5.0, (European Fusion Development Agreement, April 13, 2005), p. 3, leicht modifiziert.

setzt werden und ist daher am nächsten an einer technischen Realisation, während die Konzepte „B,“ „C,“ und „D“ technologisch anspruchsvoller sind und mehr Forschung und Entwicklungsarbeit bedürfen. Alle hier vorgestellten numerischen Ergebnisse beziehen sich auf das „einfachere“ Reaktorkonzept A.

Neben der Wasserkühlung enthalten die Blankets eine heiße flüssige Blei-Lithium-Legierung, in der die Neutronen abgebremst werden. Da Tritium in der Natur nur äußerst selten vorkommt, wird Lithium benötigt, um mit den Fusionsneutronen das in der D-T-Reaktion verbrauchte Tritium nachzubrüten:



Auf diese Weise wird in einem Fusionsreaktor der Tritiumbedarf für die fortlaufende D-T-Fusion ständig nachproduziert.

Die Bauteile des Reaktors nahe am Plasma sind einer sehr hohen, kontinuierlichen und hochenergetischen Neutronenbestrahlung ausgesetzt, welche empfindliche Materialschäden verursacht, so dass Komponenten des Reaktors regelmäßig ausgetauscht werden müssen. Für die Blankets ist je nach Materialbelastung ein Austausch etwa alle ein bis zwei Jahre vorgesehen. Der Blanketwechsel ist technologisch sehr aufwendig und der Reaktor kann während dieser Zeit nicht weiter betrieben werden. Um einen kommerziellen Betrieb der Anlage zu gewährleisten, darf der Austausch daher nicht zu oft stattfinden. Der Blanketaustausch ist in Hinsicht auf mögliche Proliferationsrisiken sensitiv, da ein Betreiber während dieses Austauschs direkten Zugriff auf die Blankets (189 im Fall von PPCS-A) hätte und diese zur Spaltmaterialproduktion umrüsten könnte.

Die thermische Leistung des PPCS-A Reaktors ist etwa 5.5 GW und entspricht damit der Leistung der größten heutigen Spaltreaktoren. Die Höhe des Reaktors beträgt etwa 18 Meter. Diese Daten zeigen, dass der PPCS-A Reaktor eine große Maschine ist, die sich aufgrund seiner Größe und seiner thermischen Signatur kaum verdeckt betreiben ließe. Allerdings könnten auch kleinere Maschinen konstruiert werden.

6.4 Tritiumabzweigung

Der einfachste Weg einen Fusionsreaktor für militärische Zwecke zu verwenden, ist die Abzweigung von Tritium, das im Reaktor im Normalbetrieb ständig in den Blankets nachproduziert und im Plasma verbrannt wird.

In einem großen Fusionsreaktor der Größenordnung des PPCS-A-Modells befinden sich zu jeder Zeit mehrere Kilogramm Tritium im Inventar.³⁶ Der tägliche Verbrauch beträgt etwa 150 Gramm pro Gigawatt thermische Leistung und 56 kg pro Gigawatt thermische Leistung pro Jahr.

Tritium ist derzeit nicht als waffenrelevantes Nuklearmaterial durch die IAEO klassifiziert und ist daher nicht Bestandteil der Verträge zwischen der IAEO und den Mitgliedsstaaten. Tritiumabzweigung für Waffenzwecke würde daher in großen Fusionsanlagen wie ITER, DEMO oder kommerziellen Reaktoren nach heutigem Stand nicht kontrolliert werden.

³⁶ Diese Zahl ist beachtlich, wenn man bedenkt, dass die gegenwärtigen globalen Tritiumvorräte auf etwa 20 kg geschätzt werden.

6.5 Spaltmaterialproduktion

Jede neutronenproduzierende Technologie hat auch das Potential für die Spaltmaterialproduktion eingesetzt zu werden. Daher können auch Fusionsneutronen theoretisch für diesen Zweck abgezweigt werden. Da die Blanketmodule in einem Fusionsreaktor aufgrund der Materialbelastung immer wieder ausgetauscht werden müssen, wäre es möglich, einen Teil der Blei-Lithium-Legierung in den Blankets durch ein fertiles Material wie Natururan oder Thorium zu ersetzen. Das fertile Material wird dann bei Einsatz des Blanketmoduls im Reaktor mit Fusionsneutronen bestrahlt, wodurch es durch Kernreaktionen in spaltbares Material (Plutonium oder $^{233}\text{Uran}$) umgewandelt wird, bis das Blanketmodul beim nächsten Wechsel wieder aus dem Reaktor entnommen wird und die Bestrahlung mit Neutronen endet.

Eine solche Verwendung der Blanketmodule ist im Normalbetrieb des PPCS-A Fusionsreaktors nicht vorgesehen, stellt aber ein mögliches Szenario dar, das bei einer Beurteilung der Proliferationsrisiken berücksichtigt werden muss. Nachdem das bestrahlte Blanketmodul während eines Routineaustausches aus dem Reaktor entfernt wurde, könnte das produzierte Spaltmaterial chemisch abgetrennt werden. Mit Hilfe von numerischen Simulationen haben wir die theoretische jährliche Produktionsrate von Plutonium für einen kommerziellen Fusionsreaktor mit den geometrischen Abmessungen und der thermischen Leistung des PPCS-A Modells berechnet, in dem die Blei-Lithium-Legierung in den Blankets durch verschiedene Volumenanteile Uran ersetzt wurde.³⁷ Im Rahmen dieses Reports sind nur die Kernresultate der Simulationen in Tabelle 1 wiedergegeben, die sich quantitativ in drei sehr einfache Aussagen zusammenfassen lassen:

- (1) Je mehr fertiles Material wie z.B. Uran im Blanket ist, desto größer ist die Menge an spaltbarem Material, die erbrütet werden kann.
- (2) Blankets nahe am Plasma sind dem stärksten Neutronenfluss ausgesetzt und produzieren daher mehr Plutonium als Blankets, die weiter vom Plasma entfernt sind.
- (3) Je größer die Anzahl der Blankets zur Materialproduktion ist, desto mehr Material kann in einem Reaktor produziert werden.

³⁷ Alle Neutronensimulationen wurde mit Hilfe des Monte Carlo N-Particle Transport Code (MCNP), D. Pelowitz, MCNPX User's Manual Version 2.7.0, LA-CP-11-00438 (2011) ausgeführt. Abbrandrechnungen wurden mit Hilfe von MCMATH, entwickelt von IANUS, Technische Universität Darmstadt, und mit Hilfe VESTA, W. Haeck, VESTA User's Manual, IRSN Report, DSU/SEC/T/2008-331 – Index A (2009) durchgeführt. Weitere technische Details der Simulationen sind in verschiedenen Papieren veröffentlicht, welche auf der www.ianus.tu-darmstadt.de/fusion zu finden sind.

	10% Uran	1% Uran	0.1% Uran	0.01% Uran
Blanket nahe (~ 2 cm) am Plasma	25-65 kg	4-10 kg	1-2 kg	100-200 g
Blanket entfernt (~ 42 cm) vom Plasma	1-3 kg	300-600 g	<100 g	<10 g
Kompletter Reaktor (360 Grad)	7450 kg	1280 kg	225 kg	27 kg

Tabelle 1: Ersetzt man einen Teil (Prozentangabe) der Blei-Lithium-Legierung in einem Blanket durch Uran können folgende Mengen an Plutonium in einem Jahr produziert werden (Rechnung ohne Betriebspausen). Die Zahlen beruhen auf physikalischen Simulationsrechnungen des Fusionsreaktor-konzepts PPCS-A mit einer thermischen Leistung von 5.5 GW. Blankets nahe an der Reaktorwand und damit nahe am Plasma produzieren mehr Plutonium als Blankets weit entfernt vom Plasma. Die Volumina der Blankets sind unterschiedlich. In der Tabelle wurden daher nur die Produktionszahlen des jeweils kleinsten und größten Blankets als Spanne angegeben. Technische Details zur Reaktorgeometrie und zur Simulation finden sich unter www.ianus.tu-darmstadt.de/fusion.

Tabelle 1 legt nahe, dass mit Hilfe eines Fusionsreaktors verschiedene Proliferationsszenarien denkbar werden: Ein Akteur, der heimlich eine kritische Masse pro Jahr produzieren will, muss nur ein einzelnes Blanket nahe am Plasma „manipulieren“ und etwa 1% des Blei-Lithiums mit Natururan ersetzen. Ein Land, das an einer schnellen und massiven Produktion von Spaltmaterial interessiert ist, würde dagegen in vielen oder in allen Blankets Uran einsetzen und könnte bei einer Beimischung von 1% Uran viele hundert Kilogramm waffengrädiges Plutonium in einem Jahr erzeugen. Allerdings würde solch eine Maßnahme nicht unentdeckt bleiben, soweit geeignete Safeguards in Kraft sind.

Falls ein Land spaltbares Material in einem Fusionsreaktor ähnlich dem Typ PPCS-A produzieren würde, ist die tatsächliche Produktion limitiert durch zusätzliche Hitze und die Reduktion der Tritiumbrutrate. Eine Beimischung von 10% in Teilen des Reaktors oder 1% im Falle des gesamten Reaktors ist aber eine realistische Annahme.

6.6 Verdeckte Operation

Die Möglichkeit an einem Fusionsreaktor heimlich oder verdeckt Spaltmaterial zu produzieren und dabei nicht entdeckt zu werden ist relativ gering. Ein verdecktes Programm würde bedeuten, dass Safeguards umgangen werden und waffengrädiges Material vom Reaktor entwendet und für ein Nuklearwaffenprogramm abgezweigt wird. Ein heimliches Programm zur Produktion von Spaltmaterial würde allerdings kaum durchführbar sein, sollten geeignete Safeguardsmaßnahmen implementiert sein, um die Blankets zu überwachen. In einem solchen Fall würde ein Proliferator versuchen die Blei-Lithium-Legierung oder die Strukturmaterialien in den Blankets zu manipulieren, um kleine Mengen fertiles Material einzuführen und hoffen, dass er nicht durch die Überwachungstechnik entdeckt wird. Mit einer solchen Operation könnte versucht werden, zwischen etwa ein bis zehn kritische Massen Plutonium pro Jahr zu produzieren, je nachdem wie viele Blankets betroffen sind und abhängig von ihrer Nähe zum Plasma (siehe Tabelle 1).

Ist schon die Umgehung von Safeguards technisch schwierig, so sind die Chancen einen ganzen Reaktor versteckt zu betreiben sehr gering (Glaser/Goldston 2012). Ein solcher Reaktor, typischerweise eine große Anlage mit einigen Hilfsgebäuden müsste völlig

heimlich gebaut und betrieben werden ohne eine physikalische Spur in der Umgebung zu hinterlassen. Ein solches Szenario ist sehr unwahrscheinlich.

Falls kein System für die Materialbilanzierung von Tritium in der Größe von Gramm-mengen entwickelt wird, welches es erlaubt die Abzweigung kleiner Mengen an Tritium festzustellen, ließen sich geringe Mengen an Tritium relativ leicht abzweigen (Reckers 2007).

6.7 Safeguards und Fusionsreaktoren

Das häufigste Safeguardsabkommen, welches die IAEO mit den NKWS des NVV abgeschlossen hat, ist das sogenannte Comprehensive Safeguards Agreement (CSA), dessen wichtigste Elemente im IAEO-Rundschreiben INFCIRC/153/ (Corrected) festgelegt sind (International Atomic Energy Agency 1972). Ein Teil der Länder mit CSA hat mit der IAEO noch ein zusätzliches Abkommen abgeschlossen, das sogenannte Additional Protocol (AP), welches der IAEO weitreichendere Inspektionsrechte einräumt als das CSA und dessen Bestimmungen im IAEO-Rundschreiben INFCIRC/540 definiert werden (International Atomic Energy Agency 1997).³⁸

Eine Anlage – *facility* – umfasst in INFCIRC/153 Reaktoren, kritische Anlagen, Konversionsanlagen, Brennstofffertigung, Wiederaufarbeitungs- und Isotopenseparationsanlagen sowie separate Materiallager oder Anlagen, an denen *nuclear material* in einer hinreichenden Menge gewohnheitsmäßig genutzt wird („is customarily used“). Diese *facilities* unterliegen der Berichtspflicht und werden routinemäßig inspiziert. Fusionsanlagen sind jedoch nicht explizit als *facility* aufgeführt. Ob Fusionsanlagen als Reaktoren gelten können, wird in den auf INFCIRC/153 und INFCIRC/540 basierenden Safeguardsabkommen streng genommen nicht definiert; zwar schränken das IAEO-Glossar oder die veralteten anlage-spezifischen INFCIRC/66, die nur noch für wenige Anlagen in Ländern außerhalb des NVV gelten, den Begriff „Reaktoren“ eindeutig auf Kernspaltung in einer Kettenreaktion ein (keine Kernfusion), das Glossar hat aber nach Aussage der IAEO-Rechtsabteilung keine allgemeine rechtliche Bindewirkung. Trotzdem legen die Definitionen nahe, dass in der Praxis die IAEO und die Mitgliedsstaaten den Begriff „Reaktor“ ausschließlich mit Kernspaltung assoziieren.

Reine Fusionskraftwerke verwenden im Normalbetrieb auch keine spaltbaren Materialien. Allerdings würden Hybridreaktoren demnach wegen des gewohnheitsmäßig eingesetzten Nuklearmaterials („is customarily used“) überwacht werden. Denn INFCIRC/153 spricht hinsichtlich solcher Anlagen Klartext: Anlagen, in denen gewohnheitsmäßig mehr als ein „effektives Kilogramm“ Nuklearmaterial Verwendung findet, fallen unter die Safeguardspflicht (International Atomic Energy Agency 1972), Art. 8 und Art. 106 (b).

³⁸ Neben CSA und AP existieren noch sogenannte Small Quantities Protocols (SQP) für NKWS mit vernachlässigbaren Aktivitäten im Bereich der Kernenergie und der Kerntechnik. Atom-mächte können mit der IAEO anlagenspezifische Safeguardsabkommen aushandeln oder sogenannte Voluntary Offer Agreements (VOA), in denen jeweils Teile der Nuklearkomplexe Sicherungsmaßnahmen unterliegen.

7. Literaturverzeichnis

- Caldeira, Kenneth/Emanuel, Kerry/Hansen, James E./Wigley, Tom* 2013: To Those Influencing Environmental Policy but Opposed to Nuclear Power; <http://nyti.ms/1gHUU5I> (26.11.2013).
- Clarke, Leon/Edmonds, Jae/Krey, Volker/Richels, Richard/Rose, Steven/Tavoni, Massimo* 2009: International Climate Policy Architectures. Overview of the EMF 22 International Scenarios, in: *Energy Economics* 21, Supplement 2, S. S64-S81.
- Cook, Ian/Marbach, G./Di Pace, L./Girard, C./Taylor, N. P.* 2001: Safety and Environmental Impact of Fusion, in: *European Fusion Development Agreement* (Hrsg.): EFDA – S – RE – 1.
- EFDA* 2012: Fusion Electricity. A Roadmap to the Realisation of Fusion Energy, in: *European Fusion Development Agreement* (Hrsg.); www.efda.org/wpcms/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf (26.11.2013).
- Englert, Matthias/Liebert, Wolfgang* 2010: Strong Neutron Sources – Is There an Exploitable Gap? Proceedings of the 51st INMM Annual Meeting INMM, Baltimore.
- Englert, Matthias* 2010: Neutronenphysikalische Simulationsrechnungen zur Proliferationsresistenz nuklearer Technologien. Dissertation. TU Darmstadt.
- Englert, Matthias/Franceschini, Giorgio/Liebert, Wolfgang* 2011: How to cope with weapon material production capabilities of fusion and spallation neutron sources. Proceedings of the 7th INMM/ESARDA-Workshop „Future Directions for Nuclear Safeguards and Verification“, Aix-en-Provence (France).
- Fischer, David* 1997: History of the International Atomic Energy Agency. The first forty years. Wien: IAEA (STI/PUB, 1032).
- Franceschini, Giorgio/Englert, Matthias/Liebert, Wolfgang* 2013: Nuclear Fusion Power for Weapons Purposes. An Exercise in Nuclear Proliferation Forecasting, in: *The Nonproliferation Review* 20 (3), S. 525-544.
- Fuhrmann, Matthew* 2009: Spreading temptation. Proliferation and Peaceful Nuclear Cooperation Agreements, in: *International Security* 34 (1), S. 7–41.
- Glaser, Alexander/Goldston, Robert J.* 2012: Proliferation Risks of Magnetic Fusion Energy: Clandestine Production, Covert Production and Breakout, in: *Nuclear Fusion* 52 (4), S. 43004.
- Goldston, Robert J.* 2011: Climate Change, Nuclear Power, and Nuclear Proliferation: Magnitude Matters, in: *Science & Global Security* 19 (2), S. 130–165.
- Gsponer, André/Hurni, Jean-Pierre* 2008: ITER: The International Thermonuclear Experimental Reactor and the Nuclear Weapons Proliferation Implications of Thermonuclear Fusion Energy Systems. Geneva (ISRI-04-01.17).
- Holdren, J. P./Berwald, D. H./Budnitz, R. J./Crocker, J. G./Delene J. D./Endicott, R. D. et al.* 1989: Report of the Senior Committee on Environmental, Safety, and Economic Aspects of Magnetic Fusion Energy, Lawrence Livermore National Laboratory (UCRL-53766).

- Hora, Heinrich/Miley, George H./Ghoranneviss, M./Malekynia, B./Azizi, N./He, Xian-Tu* 2010: Fusion Energy Without Radioactivity: Laser Ignition of Solid Hydrogen–Boron (11) Fuel, in: *Energy & Environmental Science* 3 (4), S. 479.
- Ikeda, Kaname* 2010: ITER on the Road to Fusion Energy, in: *Nuclear Fusion* 50 (1), S. 14002.
- International Atomic Energy Agency* 1972: The Structure and Content of Agreements Between the Agency and States Required in Connection with the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons. INFCIRC/153 (corrected); www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/Others/infcirc153.pdf (25.11.2013).
- International Atomic Energy Agency* 1997: Model Protocol Additional to the Agreement(s) Between State(s) and the International Atomic Energy Agency for the Application of Safeguards. INFCIRC/540 (Corrected), IAEA (Hrsg.); www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/1997/infcirc540c.pdf (25.11.2013).
- International Atomic Energy Agency* 2009: Facility Design and Plant Operation Features that Facilitate the Implementation of IAEA Safeguards. SGCP-CCA, IAEA (Hrsg.).
- International Panel on Fissile Materials* 2013: Global Fissile Material Report 2013. Increasing Transparency of Nuclear Warhead and Fissile Material Stocks as a Step Toward Disarmament, 7th Annual Report of the International Panel on Fissile Materials, in: *International Panel on Fissile Materials* (Hrsg.); www.fissilematerials.org (26.11.2013).
- Kalinowski, Martin* 2004: International Control of Tritium for Nuclear Nonproliferation and Disarmament. Boca Raton: CRC Press (Science and Global Security Monograph Series, v. 4).
- Kwasnicki, Witold* 2011: China, India and the Future of the Global Economy, in: Munich Personal RePEc Archive. Munich (Hrsg.): MPRA Paper, 32558; http://mpra.ub.uni-muenchen.de/32558/1/MPRA_paper_32558.pdf (25.11.2013).
- Lewis, Jeffrey* 2010: Is North Korea Pursuing Boosted Bombs? Arms Control Wonk; <http://lewis.armscontrolwonk.com/archive/2769/is-north-korea-pursuing-boosted-bombs> (26.11.2013).
- Maisonnier, D./Cook, I./Sardain, P./Andreani, R./Di Pace, L./Forrest, R. et al.* 2005: A Conceptual Study of Commercial Fusion Power Plants. Final Report of the European Fusion Power Plant Conceptual Study (PPCS). EFDA-RP-RE-5.0. in: *European Fusion Development Agreement* (Hrsg.).
- Meade, Dale* 2010: 50 Years of Fusion Research, in: *Nuclear Fusion* (50), S. 1–14.
- Neuneck, Götz/Mutz, Reinhard* 2000: Vorbeugende Rüstungskontrolle. Ziele und Aufgaben unter besonderer Berücksichtigung verfahrensmäßiger und institutioneller Umsetzung im Rahmen internationaler Regime, Baden-Baden: Nomos.
- OECD* 2012: Uranium 2011. Resources, Production and Demand, Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Raeder, Jürgen* 1995: Report on the European Safety and Environmental Assessment of Fusion Power (SEAFP), in: *Fusion Engineering and Design* 29, S. 121–140.

- Rauch, Carsten* 2013: On Peaceful Power Transition – Die Machtübergangstheorie, das Konzept des friedlichen Machtübergangs und der weltpolitische Aufstieg Indiens, Dissertation an der Goethe-Universität in Frankfurt am Main.
- Reckers, Jörg* 2007: Tritiumbilanzierung im Fusionsreaktor ITER. Anwendung statistischer Testtheorie auf Inspektionsstrategien bei Messunsicherheit, Diplomarbeit, Hamburg; www.znf.uni-hamburg.de/diplomReckers.pdf (26.11.2013).
- Schneider, Mycle/Froggatt, Antony* 2013: World Nuclear Industry Status Report 2013. Hrsg. Mycle Schneider Consulting, Paris/London/Kyoto; www.worldnuclearreport.org/-2013-.html (26.11.2013).
- Sokolski, Henry D. (Hrsg.)* 2008: Falling Behind, International Scrutiny of the Peaceful Atom. Carlisle, PA: Strategic Studies Institute, U.S. Army War College.

8. Abkürzungsverzeichnis

AP	Additional Protocol (Zusatzprotokoll)
B	Bor
CSA	Comprehensive Safeguards Agreement
D	Deuterium
EFDA	European Fusion Development Agreement
GW	Gigawatt
H	Wasserstoff
He	Helium
IAEO	Internationale Atomenergie-Organisation
INFCIRC	Information Circular
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
Li	Lithium
MeV	Megaelektronenvolt (Energieeinheit der Teilchenphysik)
MW	Megawatt
NKWS	Nichtkernwaffenstaaten
NVV	Nuklearer Nichtverbreitungsvertrag
p	Proton
PPCS	Power Plant Conceptual Study
Pu	Plutonium
SQP	Small Quantities Protocol
T	Tritium
Th	Thorium
U	Uran